

УДК 53.043; 53.06

## РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ МОЗАИЧНЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЕК ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. Р. Новоселов

*Учреждение Российской академии наук*

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*

*E-mail: Novoselov@thermo.isp.nsc.ru*

Обоснован выбор режима лазерного скрайбирования, позволяющий изготавливать мозаичные фотоприёмники на основе плёнок CdHgTe  $p$ -типа, выращенных молекулярно-эпитаксиальным методом на подложках GaAs, без потери информации в изображении при периоде следования фоточувствительных элементов (диаметром 10 мкм) не менее 46 мкм. Описана методика скрайбирования линейчатых фоточувствительных элементов размерностью  $4 \times 288$   $p$ — $n$ -переходов с периодом их следования 56 мкм, которая предполагает формирование двухуровневой по глубине канавки за несколько проходов. Причём в области  $p$ — $n$ -переходов формируется канавка излучением со средней мощностью 1,4 мВт, а вне области — со средней мощностью 2 мВт. При этом канавка имеет переменную глубину: вне области  $p$ — $n$ -переходов она составляет 120 мкм при ширине 22 мкм, а внутри области — 26 мкм при ширине канавки 18 мкм. Показано, что влияние лазерного излучения не приводит к ускорению деградации электрических параметров  $p$ — $n$ -переходов.

*Ключевые слова:* мозаичные фотоприёмники, лазерное скрайбирование, фоточувствительные элементы, плёнки CdHgTe  $p$ -типа, молекулярно-эпитаксиальный метод, подложки GaAs.

**Введение.** Применение тепловизионных приборов для контроля тепловых полей в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм непрерывно расширяется (астрономия, медицина, слежение за наземными и воздушными целями). Структурно такие приборы состоят из охлаждаемых фотоприёмников (ФП), оптической системы и системы охлаждения. ФП представляет собой гибридную сборку (технология flip-chip) из массива фоточувствительных элементов (ФЧЭ): приёмников излучения ( $p$ — $n$ -переходов), сформированных ионной имплантацией в узкозонных полупроводниковых материалах, например в плёнках твёрдых растворов кадмий—ртуть—теллур (КРТ) на подложке GaAs [1], и кремниевых мультиплексоров (КМ). Электрическая связь между ФЧЭ и КМ осуществляется через индиевые столбы, они же обеспечивают механическую прочность ФП.

Для повышения геометрического разрешения объектов требуется увеличение числа используемых в ФЧЭ приёмников излучения. В настоящее время для диапазонов 3–5 мкм выпускаются ФП размерностью до  $2048 \times 2048$  приёмников излучения и для 8–12 мкм — размерностью  $640 \times 480$  [2]. Дальнейшее увеличение количества приёмников излучения в ФЧЭ ограничивается рядом факторов:

1. Увеличение числа разрывов индиевых столбов связи в ФП из-за необходимости охлаждения ФЧЭ до рабочих температур в период работы прибора и неизбежный нагрев до комнатной температуры в нерабочем состоянии, вызванные применением полупроводниковых материалов в ФП, имеющих разные температурные коэффициенты линейного расширения.

2. Уменьшение процента выхода годных ФЧЭ и КМ при значительном увеличении их размеров, влекущее за собой существенное повышение стоимости ФП и делающее невыгодным их серийное производство.

3. Невозможность увеличения числа приёмников излучения в ФЧЭ за счёт уменьшения периода их следования менее двойной длины диффузии неосновных носителей из-за снижения уровня сигнала.

Указанные ограничения снимаются так называемым мозаичным принципом построения ФП, когда несколько ФП меньшей размерности устанавливаются встык друг к другу. В качестве примера можно привести мозаичные фотоприёмники размерностью  $4096 \times 4096$  приёмников излучения для диапазона длин волн 1–3 мкм, собираемые из четырёх ФП размерностью  $2048 \times 2048$  [3].

К сожалению, сдерживающим фактором массового применения мозаичного принципа изготовления ФП является появление зон повреждения материала при разделении полупроводниковых приборных пластин на чипы (скрайбирование или разрезание). В результате этого краевые элементы схемы КМ и приёмники излучения в ФЧЭ повреждаются и теряют работоспособность. Как следствие, появляется значительное число «слепых» зон в местах стыковки соседних ФП, что приводит к потере информации в изображении и ограничивает область применения мозаичных ФП.

В литературе описаны решения получения изображения без потери информации с использованием мозаичных фотоприёмников:

1. Исследование объектов, медленно изменяющих своё пространственное положение. Многократное фотографирование объекта со смещением положения его изображения на мозаичном фотоприёмнике с последующим компьютерным сложением всех изображений, что позволяет обрабатывать информацию с мозаичных фотоприёмников больших размерностей. Это, например, мозаичные фотоприёмники размерностью  $2048 \times 8192$  приёмника излучения с периодом их следования 27 мкм, состоящие из четырёх ФП размерностью  $2048 \times 2048$  каждый. Ширина зазора между ФП составляет 7641 мкм (283 строки изображения), т. е. более 17 % информации в изображении приходится на области, где отсутствуют приёмники излучения [4]. Реализация данного метода в нестационарных системах слежения за быстро движущимися объектами (такими как наземные и воздушные цели) является трудной задачей.

2. Системы слежения за быстро движущимися объектами. Мозаичные фотоприёмники состоят из одномерных (линейчатых) ФП, где краевые приёмники излучения в каждом ФЧЭ сдвинуты в сторону из общего ряда на безопасные при разрезании расстояния [5]. Информационный сигнал с них вставляется в соответствующие места изображения [5]. В таких мозаичных фотоприёмниках КМ и ФЧЭ расположены рядом в одной плоскости и связь между ними осуществляется через сапфировую пластину, на которой нанесены металлические шины для соединения КМ и ФЧЭ между собой. Данное решение нельзя реализовать для ФП, собранных по технологии flip-chip.

**Постановка задачи.** При применении алмазных дисков для разделения приборных пластин на чипы ширина зоны повреждения, содержащая трещины, неровности рельефа и области с повышенной плотностью дислокаций, вызванных остаточными напряжениями в материале, составляет в Si 20–30 мкм, в Ge 35–40 мкм и в GaAs 34–42 мкм [6]. Сведения по зоне повреждения в МЛЭ КРТ в литературе отсутствуют. При применении механического скрайбирования также возникает область поражения материала, обусловленная релаксацией упругих напряжений вокруг канавки через механизм размножения и перемещения дислокаций вдоль поверхности. Так, после механического скрайбирования КМ и отжига при температуре 1023 К (для ускорения процесса релаксации упругих напряжений) химическим травлением поверхности в селективных травителях выявляется разбег дислокаций на расстояния более 125 мкм от канавки [7]. Таким образом, при применении механических методов разделения приборных пластин формируется широкая зона повреждения, не позволяющая изготавливать мозаичные фотоприёмники без потери информации в изображении в местах стыковки ФП.

Режимы лазерного скрайбирования или разрезания приборных пластин оптимизированы, как и при использовании механических методов, на расстояния 50–100 мкм между краями диффузионных областей и центрами скрайбовых канавок [8]. Применение существующих установок лазерного скрайбирования и разрезания со средней мощностью излучения от 12 до 20 Вт при длине волны от 510,6 нм (лазер на парах меди «Кулон-15», «Каравелла-1» и "Crystalas CVL-C") до 1064,1 нм (ЛТКМ-20) также не позволяет изготавливать мозаичные фотоприёмники без потери информации в изображении.

В данной работе представлены результаты исследований по оптимизации режимов лазерного скрайбирования приборных пластин с КМ и ФЧЭ, позволяющие изготавливать мозаичные фотоприёмники без потери информации в строке с периодом следования  $p$ — $n$ -переходов в ФЧЭ (на основе плёнок  $p$ -типа МЛЭ КРТ на подложках GaAs) не менее 46 мкм. Источником излучения является импульсный лазер с длиной волны 0,34 мкм, мощностью в импульсе 2 кВт на частоте 100 Гц (средняя мощность излучения 2 мВт) при длительности импульса 7 нс.

В наших ранних работах (например, [9]) были описаны эксперименты по оптимизации режима лазерного скрайбирования полупроводниковых приборных пластин с КМ при ширине зоны повреждения 6 мкм. Режим лазерного скрайбирования — диафрагмированное излучение (диаметр диафрагмы 226 мкм, ширина канавки при этом 2 мкм и глубина 6 мкм). Диафрагма ставилась непосредственно перед линзой. Ширина зоны повреждения определялась по результатам сравнения как токов, протекающих через обратносмещённые  $p$ — $n$ -переходы, так и напряжений начала пробоя  $p$ — $n$ -переходов до и после скрайбирования. Если изменения не регистрировались, то считалось, что  $p$ — $n$ -переход находится вне зоны повреждения. При напряжении смещения 8,2 В было зарегистрировано резкое увеличение значений токов с 2 до  $10^3$  нА для расстояний от канавок до  $p$ — $n$ -переходов 6 мкм и менее, при этом напряжение начала пробоя изменялось от 100 до 60 В [10]. Для расстояний от канавки до  $p$ — $n$ -переходов не менее 13 мкм после скрайбирования изменений напряжения начала пробоя не регистрировалось. При этом токи, протекающие через  $p$ — $n$ -переходы при напряжениях смещения не менее 20 В, повышались в 2,5 раза. Эксперименты по лазерному скрайбированию приборных пластин с ФЧЭ показали, что для данного режима ширина зоны повреждения составляет не менее 20 мкм [10], т. е. возможно скрайбирование только приборных пластин с КМ для ширины зоны повреждения 6 мкм при напряжении питания 9 В и, следовательно, необходимо выяснить, при каком режиме лазерного скрайбирования ФЧЭ зона повреждения минимальна.

**Теоретический анализ.** После фокусирования линзой излучения распределение энергии в пятне на поверхности материала становится неоднородным, оно имеет явно выраженный максимум в центральной области и спадает до минимума на краях пятна, обусловленного первым дифракционным минимумом фокусирующей линзы. Выделим в пределах пятна три характерные зоны и четвёртой считаем зону вокруг области лазерного воздействия, определяющую ширину зоны повреждения:

Зона 1. Центральная область с плотностью энергии выше порога парообразования материала.

Зона 2. Область вокруг зоны 1 с плотностью энергии выше порога плавления материала.

Зона 3. Область, в которой плотность излучения не превышает порога плавления материала.

Зона 4. Область вне пределов лазерного пятна на поверхности, в которой регистрируются изменения свойств полупроводникового материала — зона повреждения.

Рассмотрим изменения агрегатных состояний в каждой зоне при однократном импульсном облучении полупроводниковых материалов. При поглощении энергии лазерного излучения материалом во всех зонах регистрируется возбуждение электронов (за  $10^{-12}$  с

с момента начала воздействия импульса). При этом плотности энергии в зонах 1 и 2 достаточно для изменения коэффициента отражения в них за время  $(1-3) \cdot 10^{-12}$  с и возникновения расплава поверхности [11]. Из-за изменения коэффициента отражения поверхности поглощение энергии в объёме полупроводника значительно уменьшается и составляет, например, 50 % для КМ (при плотностях энергии в пятне излучения на поверхности менее  $6 \text{ Дж/см}^2$ ) [12]. В зоне 1 материал со временем переходит в парообразное состояние. Время фазового перехода расплава в пар превышает длительность импульса на длине волны лазерного излучения  $0,248 \text{ мкм}$  для плотностей энергии менее  $3,5 \text{ Дж/см}^2$  (длительность импульса  $23 \cdot 10^{-9}$  с), а для длин волн  $0,532 \text{ мкм}$  для плотностей энергии менее  $8,2 \text{ Дж/см}^2$  (длительность импульса  $7 \cdot 10^{-9}$  с) [13]. При образовании пара возникает волна давления на материал, которая выдавливает расплав из зоны 2 на поверхность. Тем самым смягчается воздействие очага повышенного давления в зоне 1 на окружающий материал. При многократном облучении поверхности наблюдается зависимость изменения ширины формируемой канавки от частот повторения и температур плавления полупроводниковых материалов. В работе [14] были описаны проведённые на КМ эксперименты по определению зависимости изменения диаметра лазерной лунки от частоты повторения и количества импульсов лазерного излучения. Для частоты повторения  $100 \text{ Гц}$  после одного импульса диаметр лунки составлял  $20 \text{ мкм}$  и постепенно увеличивался до  $32 \text{ мкм}$  при  $10$  импульсах с последующим уменьшением диаметра до  $20 \text{ мкм}$  при  $400$  импульсах лазерного излучения. Для частот повторения  $10 \text{ Гц}$  зависимость диаметра входного отверстия лунки от количества импульсов не наблюдалась. Таким образом, при частотах повторения  $100 \text{ Гц}$  вокруг лунки образуется область с выдавленным на поверхность материалом диаметром  $12 \text{ мкм}$ , которую можно назвать НАЗ-зоной (heat-affected zone — зона термического влияния). Действительно диаметр зоны 2 составлял  $32 \text{ мкм}$  в многоимпульсном режиме и, следовательно, понятие НАЗ в данном случае отражает только толщину расплава на стенках лунки. Присутствие зоны 3 в излучении при скрайбировании полупроводниковых материалов в соответствии с литературными данными приводит к изменению состава поверхности и дефектности полупроводниковых материалов. Так, изменение состава в КРТ представлено в [15]. В работах [16–18] дано описание изменений в полупроводниковых материалах в зоне 3.

**Методика проведения экспериментов.** В данной работе введено понятие зоны 4 — зоны повреждения, её ширина определялась по результатам измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ)  $p-n$ -переходов до и после лазерного скрайбирования на разных расстояниях от них. Если регистрировались изменения ВАХ  $p-n$ -переходов, то данное расстояние меньше ширины зоны 4. Измерение ВАХ  $p-n$ -переходов в ФЧЭ проводилось на компьютеризированном лабораторном стенде при температуре жидкого азота  $77 \text{ К}$ , а в КМ осуществлялось характеристикографом TR 4805 (Венгрия). Измерение расстояний между канавкой, сформированной сфокусированным линзой лазерным излучением, и видимой границей тонкого окисла под легирование бором (энергия легирования  $50 \text{ кэВ}$ ) осуществлялось с помощью микроскопа «Инфрам» с точностью измерения  $\pm 0,5 \text{ мкм}$ . Для проведения экспериментов по оптимизации режима лазерного скрайбирования использовались приборные пластины с ФЧЭ, изготовленные в Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск).

**Результаты и обсуждение.** Общепринятым считается формирование зоны повреждения вокруг канавки вследствие теплового нагрева и возникновения упругих напряжений в материале. В соответствии с нашими экспериментальными результатами ширина зоны 4 на поверхности КМ превышает размеры областей, определяемых локальным тепловыделением и возникновением упругих напряжений в материале. Так, при скрайбировании работающих КМ ширина зоны 4 составляет не менее  $150 \text{ мкм}$ . На данном расстоянии от двух  $p-n$ -переходов, которое превышает возможное распространение тепловой и ударной

волн в кремнии, была сформирована скрайбовая канавка. Во время лазерного скрайбирования один из двух  $p-n$ -переходов находился под медленно изменяющимся напряжением (развёртка характериографа), другой  $p-n$ -переход (контрольный) скрайбировался с разомкнутыми контактами. После скрайбирования напряжение начала пробоя  $p-n$ -перехода изменилось с 60 до 10 В. ВАХ контрольного  $p-n$ -перехода осталась без изменения.

Рассмотрим результаты экспериментов по определению оптимального режима лазерного скрайбирования приборных пластин с ФЧЭ для минимальной ширины зоны повреждения.

При формировании скрайбовой канавки материал из зоны 2 выдавливается на поверхность и приводит к постепенному уменьшению ширины канавки. Диафрагмирование излучения (отсекание диафрагмой излучения зоны 2) позволяет устранить проблему выдавливания на поверхность материала расплава, но при этом наблюдается увеличение ширины зоны 4. Для определения влияния зоны 2 в лазерном излучении на протяжённость зоны 4 в ФЧЭ проведён следующий эксперимент. Канавки формировались вдоль крайних рядов  $p-n$ -переходов в ФЧЭ под небольшим углом к ним. При этом расстояния от канавки до  $p-n$ -переходов составили 20–28 мкм. Скрайбирование вдоль первого ряда в ФЧЭ было проведено недиафрагмированным излучением (в пятне излучения на поверхности после фокусирующей линзы присутствовали зоны 1–3). Второй ряд скрайбировался диафрагмированным излучением (диаметр диафрагмы подбирался таким, чтобы отсечь зону 2 в излучении, и составил 500 мкм). Полученные результаты: все  $p-n$ -переходы, которые скрайбировались диафрагмированным излучением, деградировали, в то время как для  $p-n$ -переходов, скрайбированных полным лучом, изменений ВАХ не было зарегистрировано. На рис. 1 представлены ВАХ  $p-n$ -перехода до (чёрные квадраты) и после (светлые квадраты) лазерного скрайбирования диафрагмированным излучением на расстоянии 20 мкм от него. Другой эксперимент был проведён в водной среде для минимизации объёма расплава на поверхности КМ. Результатом применения охлаждения водой стало увеличение ширины зоны повреждения с 13 [10] до 40 мкм. На рис. 2 представлены зависимости измеренных напряжений начала пробоя  $p-n$ -переходов в КМ от расстояний до канавки для вариантов скрайбирования в воздушной (светлые квадраты) и водной (чёрные квадраты) средах.

Таким образом, наличие зоны 2 в распределении плотности энергии в пятне на поверхности, действительно, приводит к уменьшению ширины зоны 4 в ФЧЭ и КМ, но при

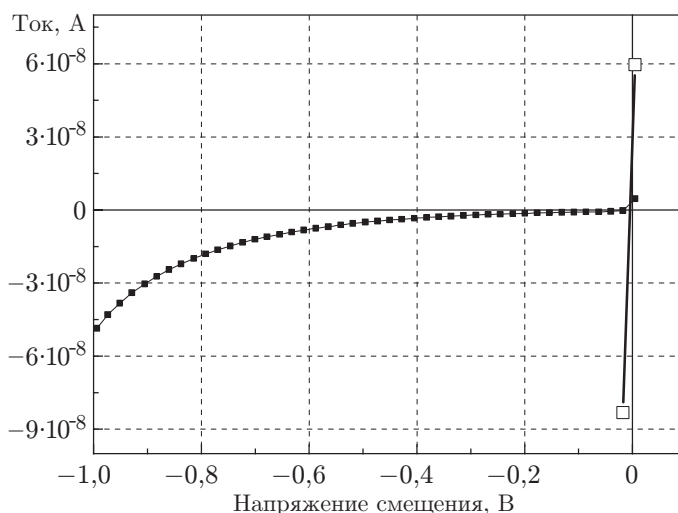


Рис. 1

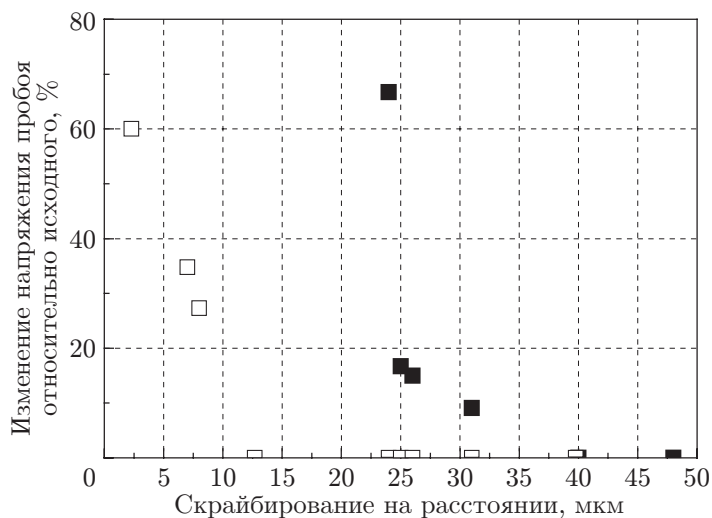


Рис. 2

этом выбросы расплава на поверхность препятствуют сборке ФП. Замена общепринятого метода формирования канавки, когда она образуется за один проход, методом формирования канавки за несколько проходов позволяет добиться уменьшения выброса расплава на поверхность материала. Это достигается, если коэффициент перекрытия двух последовательно поступающих импульсов излучения при перемещении лазерного луча вдоль поверхности равняется 50 %. Для частот повторения 100 Гц скорость перемещения лазерного луча вдоль поверхности составляет около 120 мкм/с. При такой скорости для формирования глубоких канавок (100 мкм и более) необходимо несколько проходов (в наших экспериментах не менее 30).

Рассмотрим влияние зоны 3 на ширину зоны повреждения в ФЧЭ. Для этого проведён эксперимент, когда канавки формировались вдоль крайних рядов  $p-n$ -переходов в ФЧЭ под небольшим углом к ним. Скрайбирование вдоль первого ряда в ФЧЭ проведено недифрагмированным излучением (в пятне излучения на поверхности после фокусирующей линзы присутствовали зоны 1–3). Перед скрайбированием второго ряда  $p-n$ -переходов поверхность ФЧЭ закрывалась непрозрачной для УФ-излучения защитной плёнкой — фоторезистом. Средняя мощность излучения составляла 1,4 мВт, режим скрайбирования многопроходный. В первом случае ширина зоны повреждения достигла 13 мкм при напряжении смещения на  $p-n$ -переходах  $-0,2$  В, при скрайбировании поверхности, покрытой фоторезистом, — 8 мкм. На рис. 3 представлены графики зависимостей токов через обратносмещённые  $p-n$ -переходы при сдвиге  $-0,2$  В от расстояний до скрайбовой канавки (чёрные квадраты). Область между двумя линиями (с кружками) показывает разброс токов через  $p-n$ -переходы в контрольной группе, вдоль которых скрайбирование не проводилось, т. е. в данном режиме скрайбирования ширина зоны повреждения составляет 8 мкм в отличие от результата скрайбирования первого ряда, где ширину зоны повреждения определяла зона 3.

Таким образом, предлагаемый режим лазерного скрайбирования приборных пластин с ФЧЭ даёт возможность изготавливать мозаичные фотоприёмники без потери информации в изображении с периодом следования  $p-n$ -переходов, равным 46 мкм (сумма ширин зон повреждения в двух соседних ФЧЭ 16 мкм, ширина скрайбовой канавки 16 мкм, двойное расстояние от центра до края  $p-n$ -перехода 10 мкм). Сравнивая потери изображения в зазорах между ФП в мозаичном фотоприёмнике, описанном выше, и при применении данного режима лазерного скрайбирования, видим, что они сокращаются с 17 до 0,001 %.

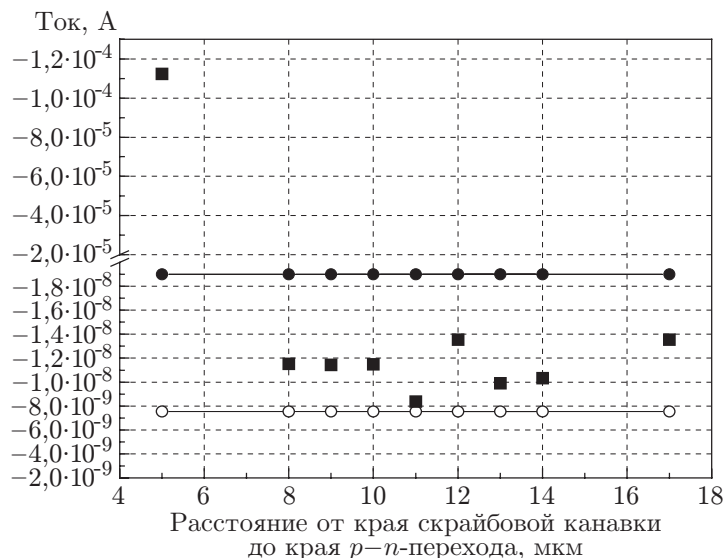


Рис. 3

В качестве примера практического применения режима лазерного скрайбирования далее представлены результаты скрайбирования линейчатых ФЧЭ размерностью  $4 \times 288$   $p$ — $n$ -переходов с периодом следования 56 мкм, конструктивно разделённых на два массива размерностью  $4 \times 144$ , сдвинутых один относительно другого на 28 мкм. Особенность скрайбирования ФЧЭ состоит в формировании двухуровневой по глубине скрайбовой канавки. В области  $p$ — $n$ -переходов формируется канавка с помощью излучения со средней мощностью 1,4 мВт (ширина канавки 16 мкм, глубина 26 мкм), а в областях, где нет  $p$ — $n$ -переходов, — излучением со средней мощностью 2 мВт (ширина канавки 22 мкм, глубина 120 мкм). Необходимость формирования двухуровневой канавки обусловлена тем, что её максимальная ширина в области  $p$ — $n$ -переходов не должна превышать 18 мкм. При этом минимальное расстояние между  $p$ — $n$ -переходами и канавкой составляет 8 мкм. Ослабление средней мощности излучения с 2 до 1,4 мВт осуществлялось введением стеклянной пластинки между лазерным источником и фокусирующей линзой с коэффициентом пропускания 0,7. Перед скрайбированием на поверхность наносился слой фоторезиста. Фотография после скрайбирования и раскола линейчатого ФЧЭ представлена на рис. 4, здесь позиция 1 — индиевый столб над  $n$ -областью; 2 — индиевая разводка; 3 — часть канавки, сделанная излучением со средней мощностью 2 мВт; 4 — часть канавки, сформированная излучением со средней мощностью 1,4 мВт. Режим лазерного скрайбирования многопроходный. Формирование двухуровневой канавки осуществляется в каждом проходе.

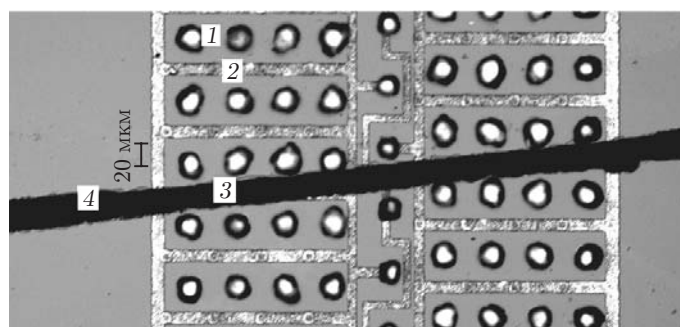


Рис. 4

Известно, что при применении механических методов разделения приборных пластин вносятся упругие напряжения в материал [7], релаксация которых приводит к увеличению ширины зоны повреждения. Нагрев ускоряет процесс релаксации напряжений в материале. Поэтому проведено сравнение изменений ВАХ  $p$ — $n$ -переходов, находящихся в зоне повреждения, с ВАХ  $p$ — $n$ -переходов, вблизи которых скрайбирование не проводилось, при температуре  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 87 ч (в том числе с промежуточными измерениями после 28 и 57 ч отжига).

В эксперименте использовался линейчатый ФЧЭ размерностью  $4 \times 288$   $p$ — $n$ -переходов, где вдоль линии  $p$ — $n$ -переходов под небольшим углом была сформирована канавка. Контрольная группа  $p$ — $n$ -переходов находилась вне области лазерного скрайбирования. Температура  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  выбрана после анализа литературных данных по влиянию отжига ФЧЭ на изменение ВАХ  $p$ — $n$ -переходов [19]: хранение ФЧЭ при комнатной температуре в течение четырёх лет не приводит к изменению ВАХ  $p$ — $n$ -переходов; отжиг при температуре  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  вызывает изменения ВАХ. Поэтому была выбрана температура заведомо ниже той, при которой зарегистрированы заметные изменения в  $p$ — $n$ -переходах МЛЭ КРТ. На рис. 5 представлены ВАХ  $p$ — $n$ -переходов ФЧЭ после лазерного скрайбирования на расстояниях 11 и 13 мкм и контрольной группы до и после отжига. Из всего семейства  $p$ — $n$ -переходов контрольной группы (5 штук) показаны только крайние зависимости (минимальная и максимальная ВАХ — сплошные кривые). Исходные ВАХ  $p$ — $n$ -переходов, вблизи которых проведено скрайбирование, находились внутри области, ограниченной сплошными кривыми. ВАХ  $p$ — $n$ -переходов после лазерного скрайбирования показаны пунктирными кривыми.

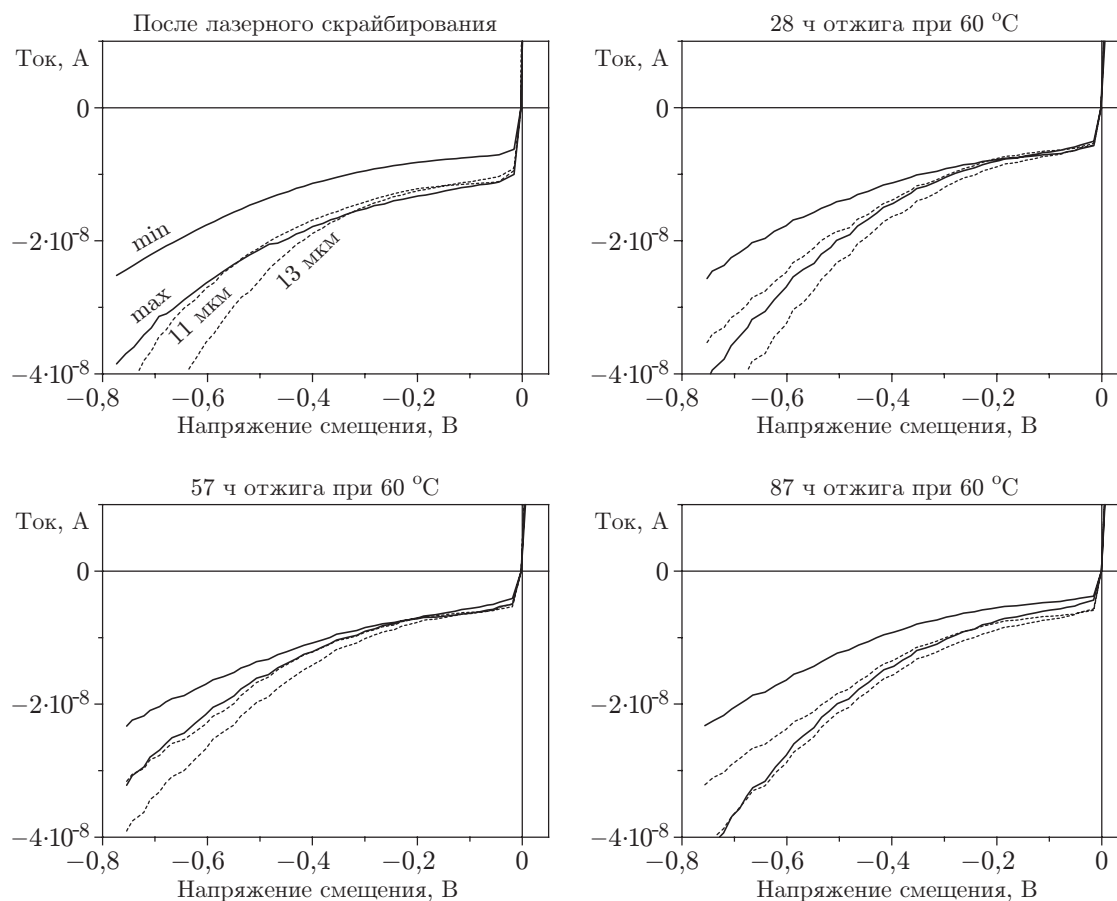


Рис. 5



ми. Измерение ВАХ  $p$ — $n$ -переходов по мере роста времени отжига не показало ускорения деградации  $p$ — $n$ -переходов вблизи канавки, т. е. влияние лазерного излучения на материал не приводит к ускорению деградации электрических параметров  $p$ — $n$ -переходов.

**Заключение.** Предлагаемый в данной работе режим скрайбирования (многопроходный, в пятне излучения плотность энергии не менее порога плавления материала) импульсным лазерным излучением УФ-диапазона позволяет изготавливать мозаичные фотоприёмники на основе плёнок  $\text{CdHgTe}$   $p$ -типа с периодом следования  $p$ — $n$ -переходов (при их размере  $10 \times 10$  мкм) в ФЧЭ не менее 46 мкм без потери информации в изображении (например, на основе ФЧЭ, описанных в [20]).

Автор выражает благодарность канд. физ.-мат. наук А. Г. Клименко и младшему научному сотруднику Д. Ю. Протасову за помощь в проведении исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I. et al.** Molecular beam epitaxy of high quality  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  films with control of the composition distribution // *Journ. Cryst. Growth*. 1996. **159**, Is. 1–4. P. 1161–1166.
2. **Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А.** Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. М.: Физматкнига, 2005. 384 с.
3. **Gulbransen D. J., Love P. J., Murray M. P. et al.** Megapixel and larger readouts and FPAs for visible and infrared astronomy // *Proc. SPIE*. 2003. **4841**. P. 770–781.
4. **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 // *Ibid.* P. 839–852.
5. **Chamonal J. P., Mottin E., Audebert P. et al.** Long linear MWIR and LWIR  $\text{HgCdTe}$  arrays for high resolution imaging // *Proc. SPIE*. 2000. **4130**. P. 452–462.
6. **Готра З. Ю.** Технология микроэлектронных устройств. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.
7. **Орлов А. М., Соловьев А. А., Явтушенко И. О., Скворцов А. А.** О перераспределении дислокаций в монокристаллах кремния вблизи концентраторов напряжений // *ФТТ*. 2007. **49**, вып. 6. С. 1039–1043.
8. **Черняев В. Н.** Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1987. 390 с.
9. **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.
10. **Новоселов А. Р., Клименко А. Г., Есаев Д. Г., Васильев В. В.** Метод лазерного скрайбирования узкозонных полупроводниковых подложек  $\text{CdHgTe}$  // *Автометрия*. 1998. № 5. С. 86–91.
11. **Rousse A., Rischel C., Fourmaux S. et al.** Non-thermal melting in semiconductors measured at femtosecond resolution // *Nature*. 2001. **410**, N 1. P. 65–68.
12. **Franghiadakis Y., Fotakis C., Tzaneyakis P.** Energy distribution of ions produced by excimer-laser ablation of solid and molten targets // *Appl. Phys. A*. 1999. **68**, N 4. P. 391–397.
13. **Hong M. H., Lu Y.** Optical detection of laser plasma interaction during laser ablation // *Proc. SPIE*. 1999. **3618**. P. 61–70.
14. **Novoselov A. R., Klimenko A. G., Fedosenko E. V., Plotnikov A. E.** Optimization of nanosecond UV laser illumination for semiconductor materials ( $\text{Si}$ ,  $\text{HgCdTe}$ ,  $\text{InSb}$ ) // *Proc. SPIE*. 2000. **3933**. P. 432–437.
15. **Afonso C. N., Alonso M., Neira J. L. H. et al.** Pulsed laser induced effects on the  $\text{HgCdTe}$  surface // *Journ. Vac. Sci. Technol. A*. 1989. **7**, N 6. P. 3256–3264.

16. **Mooney P. M., Young R. T., Karins J. et al.** Defects in laser damaged silicon observed by DLTS // Journ. Phys. Stat. Sol. 1978. **48A**, N 1. P. K31–K34.
17. **Власенко А. И., Гнатюк В. А., Копишинская Е. П., Мозоль П. Е.** Влияние лазерного облучения на фотопроводимость и шумы в монокристаллах  $n$ — $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // ФТП. 1997. **31**, № 7. С. 820–822.
18. **Parker D. L., Lin F.-Y., Zhu S.-J. et al.** Selective lifetime doping in silicon by laser scanning // IEEE Trans. Electron Dev. 1982. **ED-29**, N 11. P. 1718–1722.
19. **Васильев В. В., Овсяк В. Н., Протасов Д. Ю., Талипов Н. Х.** Влияние термообработок на параметры фотодиодов, сформированных ионной имплантацией бора в гетероэпитаксиальные слои МЛЭ  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$   $p$ —типа // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 37–41.
20. **Якушев М. В., Брунев Д. В., Варавин В. С. и др.** Гетероструктуры  $\text{CdHgTe}$  на подложках Si(310) для инфракрасных фотоприемников // Автометрия. 2009. **45**, № 4. С. 23–31.

*Поступила в редакцию 7 июня 2010 г.*

---