

ТД вблизи вышеуказанной рабочей температуры. Далее на ТЭО подается стабилизированный рабочий ток или напряжение. По достижении стационарного температурного состояния теплопоглощающей поверхности ТЭО (фиксируется по показаниям ТД) по данным вольтметра и амперметра вычисляется ее электрическое сопротивление. Далее процесс градуировки ТЭО повторяется, но уже при других значениях рабочих температур с шагом 5—10 °С вплоть до минус 60 °С. По окончании работы для каждого прибора строится график $R = f(T_x)$, где R — электрическое сопротивление ТЭО; T_x — температура теплопоглощающей поверхности ТЭО. Закончив градуировку выборки ТЭО, выясняют среднюю для них зависимость $R = f(T_x)$, а также статистическую погрешность. Как и в предыдущем случае, используя эту предельно установленную градуировочную зави-

симость, измеряя R , определяют T_x в режиме реального времени.

Таким образом, приведенные примеры нестандартных применений ТЭО в составе ФП дают возможность утверждать, что дополнительно к своему основному назначению эта интересная разновидность миниатюрных охлаждающих устройств в составе ФП может реализовывать несколько необычные, но чрезвычайно полезные функции.

Л и т е р а т у р а

1. Arakelov G. A. // Journal of Thermoelectricity. Chernivtsi: Institute of thermoelectricity. 1993. V. 1. № 1. P. 59—61.
2. Аракелов Г. А. Состояние работ и перспективы развития термоэлектрического охлаждения для фотоэлектрических полупроводниковых приемников излучения // Прикладная физика. 2002. № 6. С. 78—84.
3. Черепнин Н. В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. — М.: Сов. радио, 1966.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Some non-standard applications of thermoelectric coolers in photodetectors

G. A. Arakelov

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Many years of practical experience in the development of photodetectors (PD) with thermoelectric coolers (TEC) have proved that there are some application of said coolers which by no means can be ascribed to the standard function of thermoelectric cooler – that of cooling the photosensitive elements (PSE). When incorporated into a photodetector assembly, the thermoelectric cooler can, in particular, be used as: a technological tool to produce vacuum working medium of the instruments; a means to monitor vacuum working medium of photodetector; a temperature indicator of its heat-absorbing surface.

УДК 53.043:53.06

Применение импульсного УФ-лазера для скрайбирования фотоприемных матриц и линеек на МЛЭ КРТ

А. Р. Новоселов, А. Г. Клименко, В. В. Васильев

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Увеличение массива фотоприемных ячеек в инфракрасных фотоприемных устройствах (ИК—ФПУ) приводит к росту физических размеров фотоприемных микросхем. Этому препятствуют увеличение вероятности возникновения неработающих ячеек во время изготовления и увеличение вероятности разрыва индиевых столбов связи между КРТ-фотоприемниками и кремниевой микросхемой считывания при термоциклировании во время эксплуатации. Применение концентрированного лазерного излучения для скрайбирования позволяет избежать эти проблемы.

Требование сегодняшнего дня, предъявляемое к ИК—ФПУ — это увеличение массива фотоприемных ячеек, что позволяет получать более четкое

изображение. Увеличение массива фотоприемных ячеек приводит к росту физических размеров фотоприемных микросхем. Увеличению физических

размеров мешает ряд факторов, к которым можно отнести следующие:

увеличение вероятности возникновения неработающих ячеек во время изготовления;

увеличение вероятности разрыва индиевых столбов связи между КРТ-фотоприемниками и кремниевой микросхемой считывания и обработки изображения, а также разрушение GaAs-подложек при термоциклировании во время эксплуатации.

Известное решение, позволяющее обойти данные проблемы, — это замена монолитной, многоэлементной фотоприемной микросхемы на микросхему, состоящую из нескольких фотоприемных микросхем меньшей размерности. Таким образом, требуемая размерность сохраняется, отсутствуют дефектные ячейки и ослабляется влияние разницы коэффициентов термического расширения.

В 2002 г. фирма LETI в годовом докладе опубликовала результаты создания многомодульного линейного ИК—ФПУ, имеющего 3000 фотоприемных ячеек, состоящего из пяти микросхем детекторов и 10 кремниевых схем считывания. Основным требованием при этом является неизменность периода следования фотоприемников (ФП) при переходе с одной фотоприемной линейки на другую без пропусков по линии стыка.

Таким образом, расстояние от края микросхемы до крайнего фотоприемного элемента составляет не более 50 % периода повторения ФП, что можно реализовать лазерным разрезанием или скрайбированием фотоприемных линеек с последующим сколом, когда поверхность скола ровная и перпендикулярна поверхности.

Применение импульсного УФ-лазерного излучения для скрайбирования КРТ-пластин

Процесс лазерного скрайбирования происходит следующим образом. Импульс лазерного излучения поглощается в поверхностном слое материала, глубина поглощения зависит от длины волны и материала мишени и составляет менее микрона в УФ-диапазоне, вызывая испарение материала из рабочей области. Этот процесс известен как фотоабляция. Для формирования глубоких канавок необходимо несколько сотен лазерных импульсов в каждую точку.

При перемещении материала под лазерным излучением происходит формирование узкой V-образной канавки, где равномерность и узость дна определяют линию скола. Глубина канавки определяет прикладываемую силу для разрыва связей между атомами во время скола. Обычно глубина канавки составляет 30—50 % от толщины пластины. После лазерного скрайбирования пластину ломают, используя стандартное оборудование. На рис. 1 представлена фотография поверхности

скола МЛЭ КРТ пленки на GaAs-подложке после лазерного скрайбирования поверхности микросхемы.

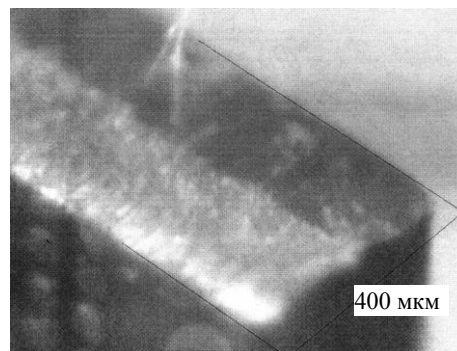


Рис. 1. Фотография поверхности скола МЛЭ КРТ на GaAs-подложке

Неоднородное по плотности в сечении лазерное излучение приводит к формированию на поверхности мишени нескольких зон, размеры которых зависят от распределения плотности излучения в сечении луча, количества импульсов, температуры материала к моменту прихода следующего импульса.

Как пример рассмотрим лазерное излучение с Гауссовым распределением плотности излучения в сечении. Рис. 2 схематично иллюстрирует зонный характер области лазер — материал взаимодействия: зона 1 — область, где плотности излучения достаточно для удаления материала из рабочей области, зона 2 — область, где плотности излучения достаточно только для плавления материала, зона 3 — область, где плотности излучения достаточно только для фотовозбуждения носителей.

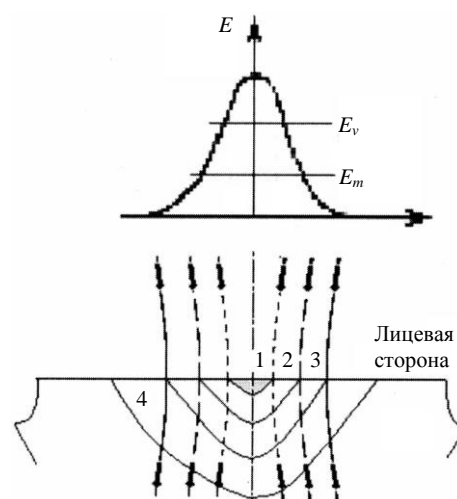


Рис. 2. Результат воздействия концентрированного лазерного излучения на материал с учетом неоднородности по плотности излучения в сечении.

E — интенсивность излучения; E_v — интенсивности излучения достаточно для испарения материала; E_m — интенсивности излучения достаточно только для плавления материала

Опубликованные ранее исследования, выполненные на кремнии [1], показывают наличие области влияния лазерного излучения на свойства полупроводникового материала (см. рис. 2, зона 4), окружающая область лазер — материал взаимодействия определяет безопасное расстояние для лазерного скрайбирования.

Довольно трудно рассматривать изменения, происходящие в материале для каждой зоны в отдельности. Приведенные ниже литературные данные охватывают воздействие всего лазерного луча, но авторы сами выделяют преобладающий отклик материала на лазерное излучение и на основе этого можно условно рассмотреть изменения по зонам.

Зона 1.

В процессе взаимодействия лазерного излучения с материалом происходит переход последнего из твердого состояния в газообразное агрегатное. Переход в газообразное состояние вещества характеризуется изменением межатомного расстояния, что может привести к возникновению волны давления на соседние атомы вещества, имеющие меньшую температуру. Условием возникновения волны давления при термомеханическом расширении слоя, где произошло поглощение энергии лазерного излучения, можно считать скорость теплового расширения [2].

Если тепловое расширение происходит медленно, то в соседних слоях вещества давление успевает выровняться и ударная волна не образуется; если тепловое расширение происходит быстро, то может возникнуть волна давления, т. е. материал будет расширяться, оказывая давление на соседние слои вещества. В результате появляется волна сжатия, которая распространяется по веществу. Если амплитуда волны сжатия превышает предел прочности материала, то могут возникнуть микротрещины в материале.

Так, в работе [3] авторы исследовали разрушение поверхности монокристаллов CdTe с ориентацией $\{100\}$, $\{110\}$ и $\{111\}$ под действием оптического квантового генератора. Начиная с плотности мощности 10^6 Вт/см² на пластинах с ориентацией $\{110\}$ образуется кратер. Трещины не возникают. При плотностях мощности более $2 \cdot 10^6$ Вт/см² вокруг кратеров возникает система трещин, которые являются следами пересечения двух плоскостей скола $\{110\}$ и $\{111\}$ с поверхностью $\{110\}$. Для пластин с поверхностью $\{100\}$ трещины образуют углы 90° по плоскостям $\{110\}$, с поверхностью $\{111\}$ — углы 120° вдоль направления $\{110\}$ и являются следом пересечения плоскостей $\{110\}$ с $\{111\}$. Химическое травление поверхности $\{111\}$ в травителе, образующем ямки травления в местах выхода дислокаций на поверхность, показало, что

плотность дислокационных ямок травления возле кратера резко возрастает до 10^8 — 10^9 см⁻² на расстоянии не более 10—40 мкм от края кратера. Вокруг трещин концентрация ямок травления такая же, как и на остальной части образца, и составляет 10^5 см⁻².

В процессе выброса материала с поверхности мишени происходит также возникновение импульса давления [4]. Так, при облучении поверхности Al Nd:YAG лазером ($\lambda = 1,064$ мкм, длительность импульса 20 нс) при энергии в импульсе 0,6 Дж электрическое поле в объеме плазмы составило 18 кВ/см, а давление в плазме — 760 Торр. Следовательно, при облучении полупроводниковых материалов повреждения в них определяются скоростью нарастания нагрева полупроводника и интенсивности абляционных процессов, определяемых плотностью энергии лазерного излучения и физическими свойствами полупроводникового материала.

Зона 2.

При плотности излучения, когда наблюдается только плавление полупроводника, происходит удаление дислокационных петель и дислокаций несоответствия, которые присутствовали в исходном материале [5, 6]. Последующий отжиг не приводит к распространению дислокаций в окружающее пространство [7].

Таким образом, область, где происходит плавление материала, можно рассматривать как буферный слой. Отсутствие или недостаточная ширина этого слоя ведут к возникновению волны давления в материале. При достаточной ширине слоя давление, возникающее из-за теплового расширения материала, ведет к выдавливанию расплавленного материала на поверхность, и волна давления не появится.

Зона 3.

В литературе подробно описывается изменение состава на поверхности полупроводникового материала под действием лазерного излучения. При плотностях излучения, менее необходимого для плавления [8], происходят образование и удаление уровней в запрещенной зоне [9—12].

Итак, лазерное излучение действует как центр деформации в материале и при плотностях излучения, не вызывающих плавление материала, может приводить к возникновению новых дислокаций [13, 14].

Зона 4.

При исследовании влияния лазерного скрайбирования кремниевых пластин на изменение ВАХ кремниевых *p-n*-переходов, находящихся в данной зоне, были зарегистрированы три следующих эффекта [15]:

лазерная радиация вызывает временное увеличение обратных токов диодов. Например, время полного восстановления тока для расстояний 36 и 78 мкм составило около 400 мин;

необратимые изменения ВАХ кремниевых $p-n$ -переходов проявляются в возникновении мягкого пробоя диода. Область не имеет четких границ, и по мере увеличения расстояния наблюдается увеличение напряжения начала мягкого пробоя диода;

наличие запирающего напряжения на диоде в момент лазерного скрайбирования вызывает необратимые изменения в ВАХ диода даже на расстояниях более 100 мкм.

Определение безопасного расстояния для лазерного скрайбирования фотоприемных микросхем на основе КРТ-пленок

Все описываемые эксперименты проводились на гетероэпитаксиальных структурах $Cd_{1-x}Hg_xTe$, выращенных на подложках GaAs {130} с буферным слоем CdTe. Пленки имели переменный состав по глубине с повышением содержания CdTe к границе с буфером и к внешней границе ($x_{CdTe} = 0,35$). Концентрация дырок составляла от 4 до $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, подвижность — $500\text{—}700 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Фоточувствительные $p-n$ -переходы формировались имплантацией бора с энергией 135 кэВ.

Измерения ВАХ проводили через 48 ч после лазерного скрайбирования, так как в отличие от кремниевых диодов временное увеличение обратных токов для КРТ-диодов составляло более 24 ч, но менее 48 ч.

В качестве источника лазерного излучения использовали импульсный УФ-лазер (ЛГИ-21) с длиной волны 0,34 мкм, длительностью 7 нс, с частотой повторения 50—100 Гц и мощностью в импульсе 2 кВт.

В опубликованной в 1998 г. работе [16] исследовалась протяженность области (см. зону 4) вокруг лазерного реза, где происходит увеличение обратных токов диодов КРТ. Протяженность области (см. зону 4) составила 18 мкм. В отличие от кремниевых диодов деградация диодов МЛЭ КРТ носит пороговый характер. Рис. 3 и 4 показывают типовое изменение ВАХ $p-n$ -переходов и обратного тока при напряжении смещения 40 мВ в зависимости от расстояния до края лазерной канавки.

Эксперимент проводился диафрагмированным лучом (диаметр диафрагмы 500 мкм) с медленным перемещением по трассе, в результате которого происходило формирование цепочки перекрывающихся кратеров. Сформированная канавка имела ширину 6 мкм и глубину 25 мкм с небольшим количеством кристаллизованного материала на краях.

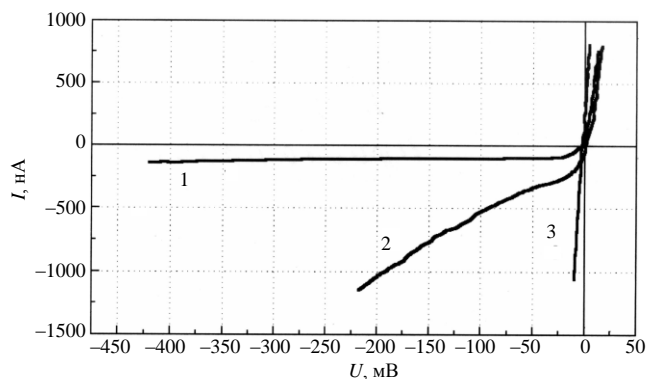


Рис. 3. ВАХ КРТ-диодов после лазерного скрайбирования: 1 — на расстояниях более 20 мкм и исходная; 2 — один из вариантов обратной ВАХ на расстояниях 13—20 мкм; 3 — обратная ВАХ диодов для расстояний менее 13 мкм

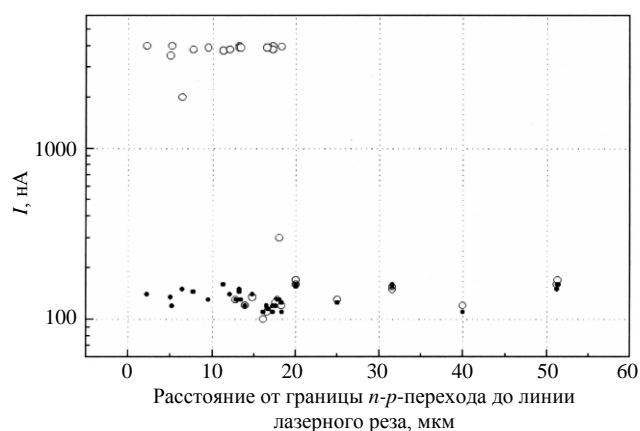


Рис. 4. Зависимость изменения токов КРТ-диодов при напряжении смещения 40 мВ от расстояния до линии лазерного реза:

- — исходный обратный ток КРТ-диода; ○ — ток после лазерного скрайбирования

Отсутствие зоны 2 (диаметр диафрагмы 400 мкм) приводит к увеличению зоны 4 до 28 мкм. Лазерная канавка имела ширину 9 мкм и глубину 40 мкм с отсутствием кристаллизованного материала на краях.

Увеличение протяженности буферного слоя (см. зону 2) — скрайбирование полным лучом (диаметр излучения 3,4 мм) вдоль $p-n$ -переходов показало, что протяженность области влияния лазерного излучения (см. зону 4) составила 19,6 мкм. Глубина канавки — 112 мкм.

Таким образом, существует возможность осуществления лазерного скрайбирования МЛЭ КРТ на расстояниях не более 18 мкм от $p-n$ -переходов лазерным излучением, плотности излучения в котором достаточно для испарения и плавления материала (см. зоны 1 и 2). Однако применение излучения с плотностью, образующей глубокую канавку, возможно только при достаточно протяженной зоне 2, что приводит к формированию из выдавленного и кристаллизованного материала

достаточно высокого валика, который не позволяет соединить такую микросхему с кремниевым устройством считывания без его удаления.

Методика формирования лазерной канавки при скрайбировании МЛЭ КРТ

На рис. 5 и 6 представлены, соответственно, схема лазерного скрайбирования фотоприемной линейки МЛЭ КРТ и фотография скрайбированной поверхности этой линейки 2×64 на основе *p-n*-переходов МЛЭ КРТ.

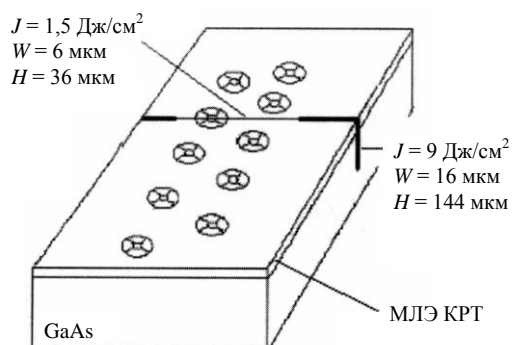


Рис. 5. Схема лазерного скрайбирования фотоприемной линейки 2×64 на основе *p-n*-переходов МЛЭ КРТ

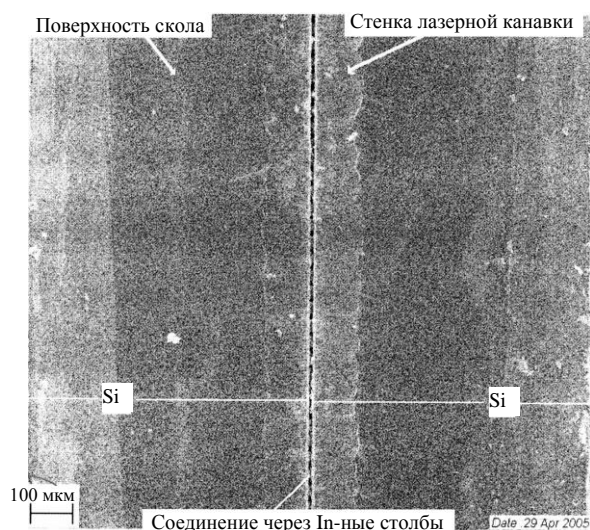


Рис. 6. РЭМ-фотография сборки двух кремневых микросхем, края которых были скрайбированы лазерным излучением с последующим сколом

По линии будущего скола в одном технологическом цикле, вблизи фотоприемных детекторов (например *p-n*-переходов), создается неглубокая скрайбированная канавка, провоцирующая линию скола, превышающую толщину пленки КРТ, а в местах, где концентрированное излучение не вызовет изменения электрофизических свойств фотодиодов, создается скрайбированная канавка максимальной глубины. После скрайбирования осуществляется скол.

Полученные таким образом фотоприемные микросхемы стандартным методом flip-chip соединяются с кремниевым устройством считывания в гибридную сборку.

На рис. 6 представлена РЭМ-фотография сборки двух кремневых микросхем, края которых были скрайбированы лазерным излучением с последующим сколом.

На рис. 7 представлена гибридная сборка размерностью 2×64 элемента, состоящая из трех линейных фотоприемных микросхем и одного устройства считывания на кремнии.

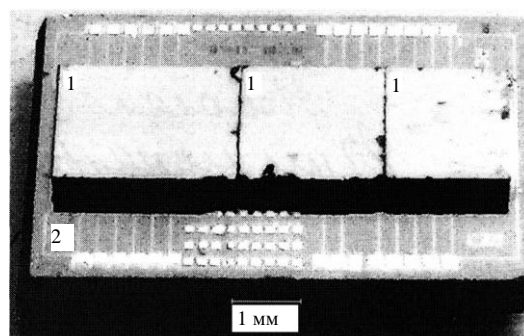


Рис. 7. Фотография линейного ИК—ФПУ: 1 — фотоприемные линейки МЛЭ КРТ; 2 — схема считывания на кремнии

Итак, применение лазерного скрайбирования узкозонных полупроводниковых материалов позволяет осуществлять скрайбирование и матричных фотоприемных микросхем. Для этого вдоль матрицы формируется первая канавка ослабленным излучением с глубиной, равной толщине слоя МЛЭ КРТ, где сформированы *p-n*-переходы (как пример, слой МЛЭ КРТ толщиной 10 мкм на GaAs). После этого осуществляется формирование второй скрайбированной канавки, смещенной на 5 мкм в сторону, противоположную полю фотоприемников излучением, с полной мощностью и максимальной глубиной. При таком методе воздействие мощного лазерного излучения осуществляется только на GaAs-подложку, не затрагивая слоя МЛЭ КРТ.

Выводы

1. Проведены исследования изменения параметров фотодиодов на основе МЛЭ КРТ в зависимости от расстояния до лазерной скрайбированной канавки и режимов лазерного излучения. В качестве источника лазерного излучения использовали импульсный УФ-лазер (ЛГИ-21) с длиной волны 0,34 мкм, длительностью 7 нс, с частотой повторения 50—100 Гц и мощностью в импульсе 2 кВт.

2. Найден режим лазерного скрайбирования на расстояниях 18—20 мкм от фотодиодов, при которых исходные ВАХ сохраняются.

3. Разработан метод лазерного скрайбирования линеек и матриц МЛЭ КРТ, применимый к созданию гибридных, многомодульных ИК—ФПУ. Результатом является неповреждающее скрайбирование фотоприемных линеек КРТ, имеющих $\lambda_c = 12$ мкм, на расстояниях 18—20 мкм от фотоприемных *p-n*-переходов.

4. Проведенное исследование, направленное на применение импульсного УФ-лазерного скрайбирования фотоприемных матриц и линеек на МЛЭ КРТ, показало, что:

влияние лазерного излучения на материал выходит за границы области лазерного излучения, вызывая изменения в окружающем материале. Эти изменения аналогичны изменениям, регистрируемым в кремнии;

применение лазерного скрайбирования МЛЭ КРТ позволяет снять ограничение на размерность фотоприемных микросхем с шагом 40 мкм и менее;

полученные данные позволили осуществить изготовление линейчатого, многомодульного ИК—ФПУ и в перспективе позволят неограниченно увеличивать длину строк линейчатого многомодульного ИК—ФПУ.

Литература

1. Novoselov A. R., Klimenko A. G.// Proceeding SPIE. 1999. V. 3834. P. 269.

2. Дж. Реди. Действие лазерного излучения: Книга. — М.: Мир, 1974.

3. Водоватов Ф. Ф.// Физика и химия обработки материалов. 1969. № 1. С. 148.

4. Bukin O. A., Basarov L. V., Bodin N. S., Kiselev V. D., Major A. Y., Tsarev V. I.// Proceeding SPIE. 1999. V. 3734. P. 41.

5. Narayan J., Young R. I.// J. Applied Physics Letter. 1978. V. 33. № 1. P. 14.

6. Hofker W. K., Oosthoek D. P., Eggermont G. E. J. et al.// Ibid. 1979. V. 34. № 10. P. 690.

7. Fairfield J. M., Schwutte G. H.// J. Solid-State Electronics. 1968. V. 11. № 12. P. 1175.

8. Afonso C. N., Alonso M., Neira J. L. H., Sequeira A. D., M. F. da Silva, Soares J. C.// J. Vacuum Science Technology A. 1989. V. 7. № 6. P. 3256.

9. Mooney P. M., Young R. T., Karins J. et al.// J. Physic Status Solidi. 1978. V. 48A. № 1. P. k31.

10. Benton J. L., Doherty C. J., Ferris S. D. et al. Post illumination annealing of defects in laser — processed silicon, laser and electron beam processing of materials. — N.Y.: Acad. Press. 1980.

11. Yuba Y., Gamo K., Murakami K., Namba S.// J. Applied Physics Letter. 1979. V. 35. № 2. P. 156.

12. Emerson N. G., Sealy B. J., Kular S. S. et al.// J. Electron Letter. 1979. V. 15. № 18. P. 553.

13. Narayan J., Young F. W.// J. Applied Physics Letter. 1979. V. 35. № 4. P. 330.

14. Балдуллаева А., Власенко А. И., Кузнецов Э. И., Ломовцев А. В., Мозоль П. Е., Смирнов А. Б.// Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 8. С. 960.

15. Novoselov A. R.// Proceedings SCI. 2001/ISAS 2001. V. 27.

16. Новоселов А. Р., Клименко А. Г., Есаев Д. Г., Васильев В. В.// Автометрия. 1998. № 5. С. 86.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Application of pulsed UV laser for dicing of arrays and linear of photodiodes based on MCT solid solution

A. R. Novoselov, A. G. Klimenko, V. V. Vasiliev
Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

Increase the quantity of photodetectors in monolithic IR FPA brings about increase the physical sizes of microcircuit. It is increase of probability refusal of separate cells the origin during fabrication and increase of probability break off of indium interconnection between microcircuit of the photodetectors and silicon microcircuit of the sensing under thermocycles during of works. Using of concentrated laser radiation for dicing allows to avoid these problems.