

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 53.06

СКРАЙБИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ПРИБОРНЫХ ПЛАСТИН ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

© А. Р. Новоселов

*Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1
E-mail: novoselov@oesd.ru*

Исследован результат воздействия скрайбирования лазерным излучением в водной среде на кремниевые сверхбольшие интегральные схемы, применяемые в гибридных фотоприёмниках инфракрасного излучения. Установлены ширина повреждения материала вокруг скрайбовой канавки, которая составила около 47 мкм, а также возникновение гидроудара при вскипании воды во время скрайбирования, оказывающего давление на материал не менее $1,5 \cdot 10^{-6}$ кг/мкм².

Ключевые слова: СБИС, лазерное скрайбирование, зона повреждения.

DOI: 10.15372/AUT20210112

Введение. В технологии изготовления полупроводниковых интегральных схем применяется лазерное излучение. Например, лазерным излучением разделяют приборные пластины на отдельные сверхбольшие интегральные схемы (СБИС). После скрайбирования или разрезания приборной пластины, в режиме формирования канавки за один проход вблизи неё на поверхности регистрируется наличие застывшего расплава материала, который может мешать дальнейшим технологическим операциям. Рассмотрим причину появления расплава на поверхности приборной пластины при гауссовом распределении плотности энергии в пятне излучения. Выделим четыре характерные области на поверхности. В пятне излучения три области: центральная (1), где превышен порог парообразования материала, выше порога начала плавления (2), область с плотностью энергии меньше порога плавления материала (3) и область (4) вне пятна излучения, в которой регистрируются разными способами повреждения материала [1]. Во время выброса материала в форме пара (1) из области (2) давлением паров расплав выдавливается на поверхность, а по мере углубления канавки остаётся на её боковых стенках, формируя неровный край. Известен способ формирования канавок лазерным излучением в струе воды [2], при котором на поверхности и стенках канавки не остаётся расплавленного материала. Непрерывная струя воды немедленно охлаждает область разреза, эффективно уменьшая зону теплового воздействия. Удаляемый материал мгновенно охлаждается струёй воды и смывается. Струя воды (как утверждают авторы [2]) обеспечивает полное внутреннее отражение излучения на границе раздела вода/воздух (аналогично стандартному оптическому волокну), в результате излучение остаётся когерентным, размер пятна излучения всегда постоянен. В итоге получается очень узкий чистый разрез без неровностей, с параллельными стенками и без видимых термических повреждений. Длина волны лазерного излучения выбрана в соответствии со спектром поглощения дистиллированной воды (рис. 1) от 300 до 700 нм.

Цель представленной работы — выяснить особенности воздействия лазерного излучения на полупроводниковые материалы в водной и воздушной средах, возможности приме-

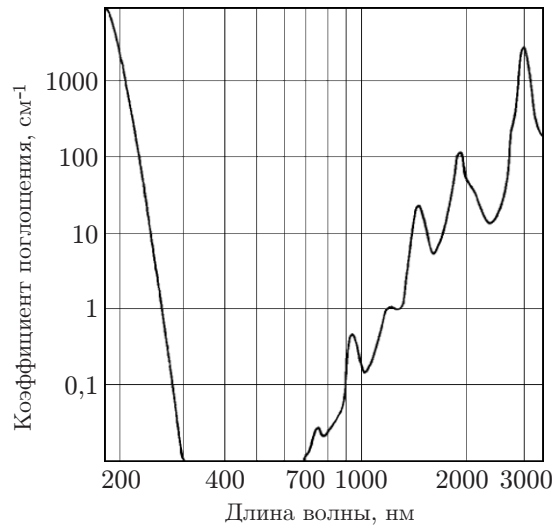


Рис. 1

нения данного способа для скрайбирования приборных пластин со СБИС. Для этого были решены следующие основные задачи:

- 1) на основе литературных источников выяснен процесс взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами в воздушной среде при различных длинах волн и плотностях энергии излучения в пятне воздействия;
- 2) осуществлено лазерное скрайбирование кремниевых СБИС в водной среде.

Взаимодействие лазерного излучения с полупроводниковыми материалами.

При облучении лазерным излучением поверхности полупроводниковых материалов образуются фотогенерированные электронно-дырочные пары. Их концентрация зависит от плотности энергии лазерного излучения, коэффициентов отражения и поглощения излучения материалом [3]. Например, из-за очень высокой плотности энергии лазерного излучения в кремнии при облучении поверхности импульсом длительностью несколько пикосекунд концентрация электронно-дырочных пар составляет около 10^{21} см⁻³ [4]. За время возбуждения электрона (около 10^{-12} с [5]) часть их преодолевает потенциальный барьер на границе материала (внешний фотоэффект). Функция распределения по энергиям электронов, оставшихся в материале, отличается от равновесной, т. е. появляются «горячие электроны» [6]. Время термализации таких электронов в материале составляет $(0,1-1) \cdot 10^{-12}$ с [7]. За этот период происходит «охлаждение» электронов до энергий, соответствующих дну зоны проводимости [8]. По оценкам, представленным в [9], для рассеяния 1 эВ электронам требуется около 20 соударений с атомами материала. Расстояние, на котором электроны охлаждаются, составляет несколько сотен ангстрем [4].

Известно [10], что при возбуждении 10 % и более валентных электронов происходит разрушение кристаллической структуры материала и последующее образование расплава. Причём дефекты кристаллической структуры являются центрами, с которых начинается расплав поверхности [11]. За время действия импульса из-за теплового нагрева материала [12] область расплава составит

$$L_D = \sqrt{D\tau},$$

где D — коэффициент температуропроводности материала, τ — время нахождения материала в жидком агрегатном состоянии (суммарное время длительности импульса излучения и времени остывания расплава).

Коэффициент температуропроводности материала, который характеризует скорость изменения температуры в нестационарных тепловых процессах, связан с тепловыми параметрами материала соотношением

$$D = \lambda/(\rho c),$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала, ρ — удельная плотность материала, c — теплоёмкость материала.

В [4] установлено, что для лазерного излучения с длиной волны 0,531 мкм при плотностях энергии 0,03–0,60 Дж/см² за время действия импульса лазерного излучения длительностью $(10\text{--}50) \cdot 10^{-12}$ с увеличение областей расплава поверхностей Si и GaAs составит сотни ангстрем. Для более продолжительных импульсов излучения $((10\text{--}50) \cdot 10^{-9}$ с) область расплава повышается на несколько микрон.

Во время поглощения энергии излучения полупроводниковыми материалами наблюдается изменение коэффициента отражения поверхности [13]. Авторы выяснили, что коэффициент отражения начинает изменяться до плавления поверхности и регистрируется при плотностях излучения ниже порога начала плавления. Время изменения коэффициентов отражения поверхностей Si, GaAs и InSb зависит от плотности энергии излучения. Для плотностей энергии, превышающих порог плавления в 2 раза, изменение коэффициента отражения поверхности до значений, соответствующих расплаву материала, происходит менее чем за 10^{-12} с. С уменьшением плотности энергии изменение коэффициента отражения замедляется, но не превышает 10^{-12} с. В эксперименте применялось лазерное излучение с длиной волны 0,830 мкм, длительностью импульса $1,2 \cdot 10^{-13}$ с и плотностью энергии 0,12 Дж/см². Изменение коэффициента отражения поверхности регистрировалось охлаждаемой ПЗС-камерой.

С увеличением коэффициента отражения поверхности уменьшается поглощение энергии излучения в полупроводниковых материалах. Так, при расплаве поверхности кремния количество ионов в выбросе пара с поверхности снижается на 50 % (для плотностей энергии в импульсе до 6,30 Дж/см²) [14]. Для германия при плотностях излучения до 3,90 Дж/см² количество эмитировавших ионов уменьшается на 30 % и более. В эксперименте применялся лазер, работающий на длине волны 0,248 мкм, с длительностью импульса $25 \cdot 10^{-9}$ с. Регистрация количества ионов в выбросе осуществлялась времяпролётным методом (измерение распределения скоростей атомов, вылетевших с поверхности полупроводниковых материалов при лазерном облучении).

Таким образом, время основного поглощения энергии во всём пятне излучения составляет $(1\text{--}3) \cdot 10^{-12}$ с. В оставшееся время до окончания импульса излучения для плотностей энергии менее 3,90 Дж/см² из-за увеличения коэффициента отражения поглощение энергии излучения составляет всего 30–50 %.

При плотностях излучения, достаточных для испарения материала при фазовом переходе расплава в пар, выброс затеняет поверхность материала и препятствует поглощению излучения. На рис. 2, а показаны зависимости времени затенения поверхности кремния выбросом от плотности энергии для длин волн 0,248 и 0,531 мкм [15]. На рисунке видно, что при облучении поверхности кремния лазерным излучением с длиной волны 0,248 мкм пороговая плотность энергии начала парообразования составляет около 1,00 Дж/см², а для длины волны 0,531 мкм — 4,00 Дж/см². Для плотностей энергии менее 3,50 Дж/см² при длине волны излучения 0,248 мкм и длительности импульса $23 \cdot 10^{-9}$ с и плотностей энергии менее 8,20 Дж/см² при длине волны излучения 0,531 мкм и длительности импульса $7 \cdot 10^{-9}$ с выброс пара с поверхности происходит после окончания импульса излучения.

Расплав на поверхности начинает остывать. В [1] представлены результаты исследований времени нахождения поверхности в расплавленном состоянии после окончания

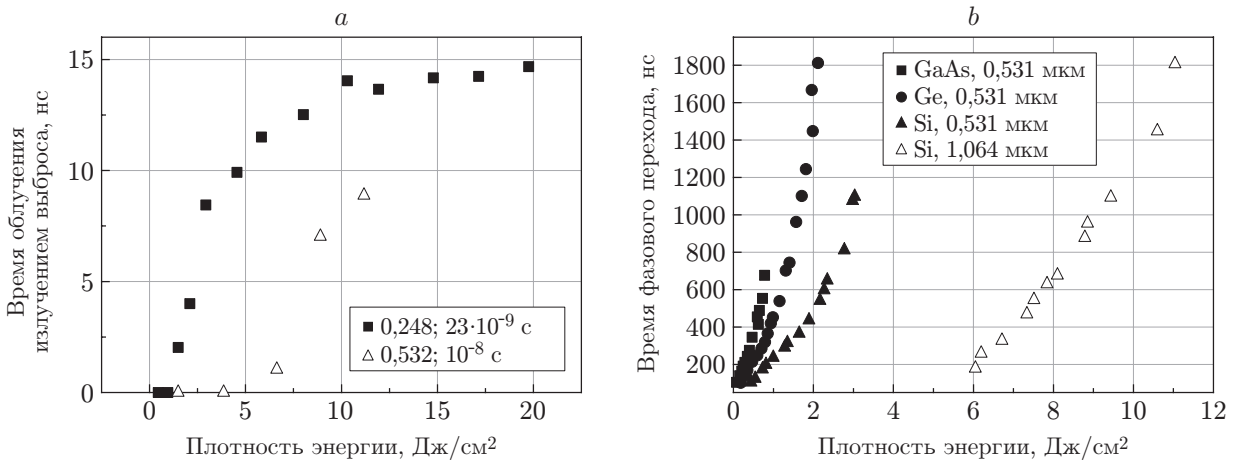


Рис. 2

импульса излучения для разных плотностей энергии и длин волн. Зависимость времени нахождения поверхности полупроводниковых материалов Si, Ge и GaAs в расплавленном состоянии после окончания импульса излучения от плотности энергии и длины волны представлена на рис. 2, *b*. В соответствии с рисунком время нахождения поверхности полупроводниковых материалов в расплавленном состоянии составляет $(20\text{--}1800) \cdot 10^{-9}$ с. На длине волны 0,531 мкм пороговая плотность энергии начала плавления GaAs равна 0,10 Дж/см², для Ge — 0,15 Дж/см² и Si — 0,33 Дж/см², а на длине волны 1,064 мкм для Si — около 6,00 Дж/см².

На основе анализа литературных данных выяснено, что за время действия одного импульса длительностью, превышающей время выброса пара, характер взаимодействия излучения с полупроводниковыми материалами имеет пульсирующий характер. Для лазерного скрайбирования пластин со СБИС длина волны должна быть менее 0,531 мкм, а длительность импульса менее $23 \cdot 10^{-9}$ с. Источник импульсного лазерного излучения на молекулах азота (ЛГИ 21) имеет длину волны излучения 0,337 мкм, длительность импульса $7 \cdot 10^{-9}$ с, среднюю мощность излучения $2 \cdot 10^{-3}$ Вт и полностью удовлетворяет выясненным требованиям. Данный лазерный источник был использован в экспериментах по скрайбированию в водной среде (см. рис. 1).

Область взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами. Известна модель, где рассматривается область взаимодействия излучения с материалом, которая ограничивается диаметром сформированной лунки [16]. Нагрев материала вокруг лунки или канавки за время действия импульса в соответствии с моделью происходит из-за диффузии тепла от стенок в объём материала. Модель, ограничивающая пятно излучения размерами лунки, не учитывает, что в распределении плотности энергии после фокусирующей линзы на периферии пятна облучения существует область с плотностью энергии менее порога плавления. В [17] показано, что при облучении поверхности КРТ зона расплава находится в пределах пятна. На рис. 3 представлены две РЭМ-фотографии поверхности КРТ после 1 и 32 импульсов излучения, следующих с частотой повторения 20 Гц. Длина волны лазерного излучения равна 0,775 мкм, длительность импульса — $2 \cdot 10^{-13}$ с, энергия в импульсе — 10^{-6} Дж [17]. Фотографии иллюстрируют превышение диаметром пятна диаметра лунки и области с выдавленным на поверхность расплавом. Цифрой 1 на фотографии обозначена внешняя граница области расплава поверхности КРТ.

Таким образом, пятно излучения превышает размеры формируемой канавки. В предлагаемой модели [1] при гауссовом распределении плотности излучения учтено существо-

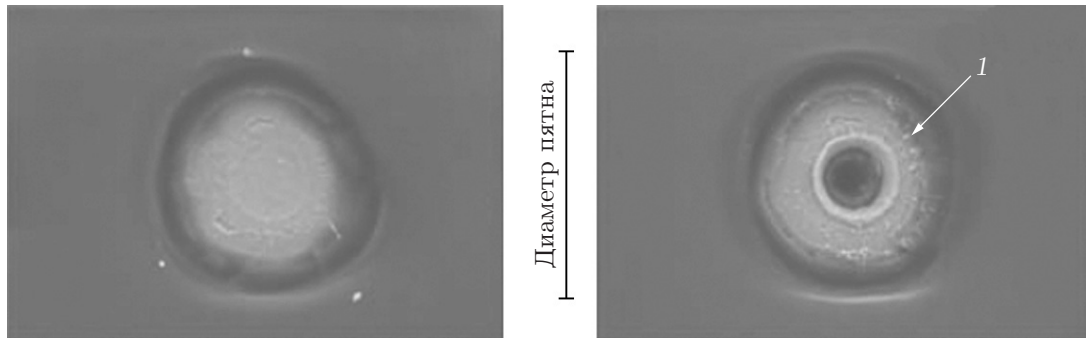


Рис. 3

вание кольцевой области на периферии пятна излучения с плотностью излучения меньше порога плавления материала. Пятно излучения на поверхности материала содержит три области: центральную с плотностью излучения, превышающей порог начала парообразования материала; круговую с плотностью излучения, превышающей порог плавления материала, и область ниже порога плавления [1]. Внешняя граница пятна излучения обусловлена первыми дифракционными минимумами фокусирующей линзы (объектива). Зона повреждения окружает третью область и находится вне пределов пятна излучения. Более подробное представление теории и экспериментов по описанию оптимального для лазерного скрайбирования режима, обеспечивающего минимальную ширину зоны повреждения вокруг канавки, дано в [18]. При этом режиме скрайбирования возможно формирование канавки, одна стенка которой перпендикулярна поверхности [19].

Формирование канавки в водной среде. Введение водной среды в процесс взаимодействия лазерного излучения с материалом в литературе подробно не рассмотрен. Не исследовано влияние водной среды на ширину зоны повреждения вокруг канавки. Ввод лазерного излучения в струю воды является достаточно сложной технической операцией. Поэтому был применён другой способ, описанный в [20], когда образец помещается в водную среду. В эксперименте кремниевые СБИС находились под слоем воды 2 мм.

Этим способом скрайбирования мы воспользовались при изучении пластических свойств индиевых столбов связи для гибридных фотоприёмников на основе гетероэпитаксиальных плёнок твёрдых растворов КРТ [21]. Визуально исследовались результаты деформации индиевых столбов после сдавливания половинок матричных кремниевых СБИС с индиевыми столбами связи, которые получены лазерным скрайбированием целых чипов в водной среде и последующим расколом. Применение лазерного скрайбирования в водной среде было вызвано необходимостью формировать канавки на расстояниях 25–40 мкм от индиевых столбов. Поверхность СБИС при этом должна оставаться чистой после скрайбирования. Данные расстояния обусловлены предельными возможностями РЭМ, с помощью которого рассматривались результаты деформации индиевых столбов после гибридизации ФПУ через щель шириной около 6 мкм (расстояние между чипами после их гибридизации) [1]. Применение стандартного способа скрайбирования в воздушной среде было невозможно из-за загрязнения поверхности продуктами выброса. Кремниевая СБИС с индиевыми столбами связи с матрицей фотоприёмников скрайбировалась в водной среде, раскалывалась на две части, которые соединялись между собой по технологии «flip-chip». На рис. 4 представлена РЭМ-фотография края такой сборки. Фотография приведена для демонстрации полного отсутствия расплава на поверхности и стенках канавки. На фотографии видны края алюминиевых контактных площадок под индиевыми столбами, изолирующие слои диоксида кремния и алюминиевая токопроводящая дорожка.

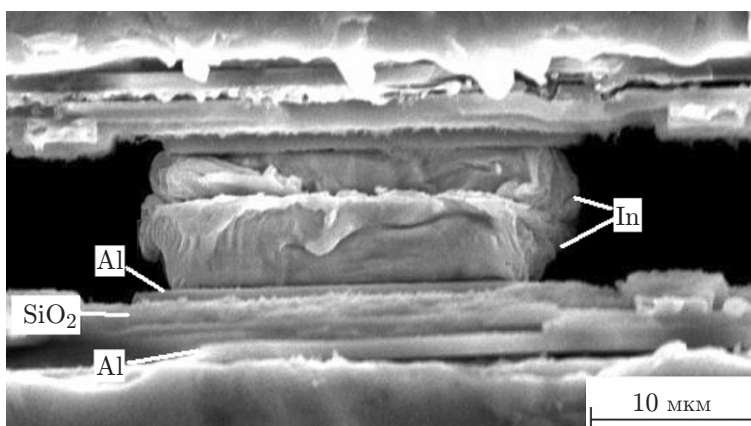


Рис. 4

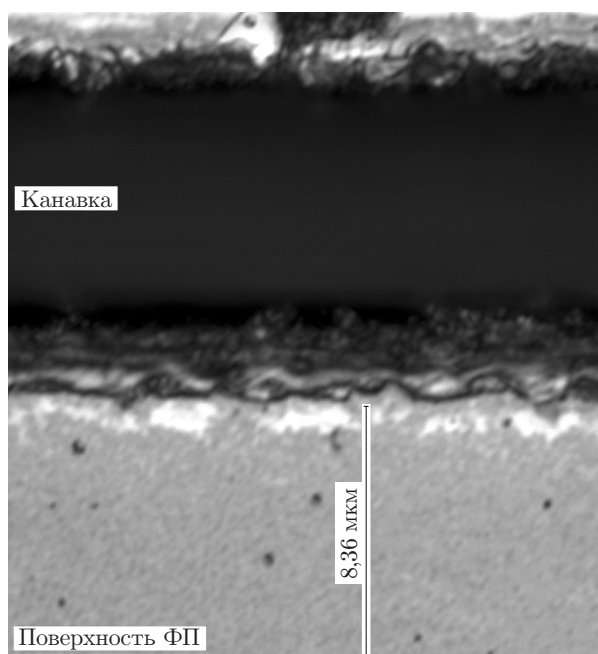


Рис. 5

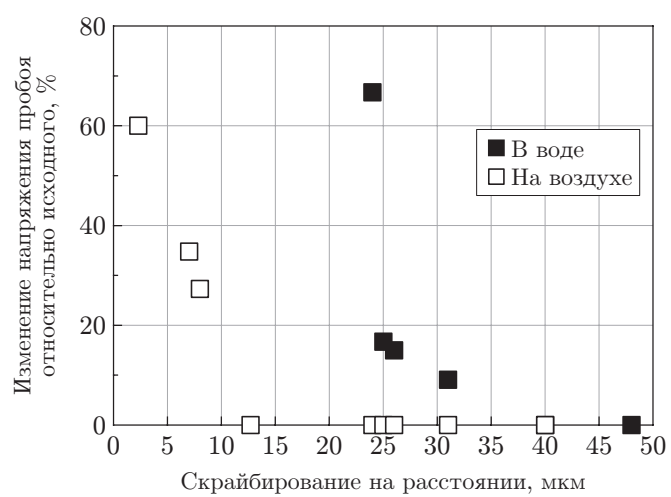


Рис. 6

Формирование канавки в оптимальном режиме с минимальной шириной области повреждения вокруг канавки. На планарную сторону СБИС наносят защитное покрытие, обеспечивающее поглощение лазерного излучения с плотностью энергии, меньшей порога плавления (область 3) в материале защитного покрытия (фоторезист марки S1813TM толщиной не менее 1 мкм, который после нанесения на поверхность приборной пластины отжигают в течение 2 мин при температуре 116 °С). Затем производят скрайбирование с использованием многопроходного режима, при этом скорость движения пластины выбирают из условия отсутствия на поверхности больших зон расплава материала за счёт перекрытия световых пятен от импульсного излучения (~ 10 %), а также отсутствия уменьшения ширины канавки за счёт осаждения расплава. При скрайбировании формируют канавку симметричной V-образной формы, направляя излучение по нормали к поверхности приборной пластины. Скрайбирование осуществляют с использованием многопроходного режима (около 50 проходов) при скорости около 120 мкм/с и плотности энергии около 3,60 Дж/см².

На рис. 5 представлена фотография поверхности фотоприёмника на основе гетероэпитаксиальных плёнок твёрдых растворов КРТ на подложке GaAs для демонстрации стенок канавки, покрытых слоем расплава, не выходящим за пределы канавки. Для повышения качества фотографии после лазерного скрайбирования с поверхности удалены диэлектрические слои SiO₂, Si₃N₄. Канавка сформирована за 50 проходов при плотности энергии около 2,6 Дж/см² [22].

Отметим, что на глубину сформированной канавки влияет область перетяжки (глубина фокуса) объектива и расстояние до поверхности образца. Поэтому для формирования канавок постоянной глубины необходимо подбирать образцы с незначительными искривлениями поверхности. В [23] описан интерференционный метод исследования искривления формы поверхности полупроводниковых СБИС.

Сравнение протяжённости зон повреждения в кремниевых СБИС. Ширина зоны повреждения регистрировалась по изменению напряжения начала пробоя *p-n*-переходов в СБИС после скрайбирования. В результате проведённого эксперимента выяснено, что при скрайбировании на воздухе граница зоны повреждения составила около 13 мкм, а при скрайбировании в водной среде — 47 мкм [18]. Эксперимент показал, что быстрое охлаждение расплава водой значительно расширяет границы нарушенных слоёв (область 4 [1]). Результаты эксперимента представлены на рис. 6. Уменьшение напряжения пробоя связано с возникновением так называемой области «мягкого» пробоя *p-n*-переходов.

Экспериментальная часть. При проведении исследований по скрайбированию СБИС в водной среде был обнаружен эффект деформирования (смещения) ближайших к канавке индиевых столбов. Это смещение можно объяснить гидроударом при вскипании воды во время лазерного импульса. На рис. 7 представлена фотография фрагмента края кремниевой СБИС с индиевыми столбами после скрайбирования в водной среде и раскола. На рисунке схематично показано постепенное сужение области распространения волны давления пара по мере углубления канавки. Более сильная деформация верхней части в сравнении с основанием столба является подтверждением предположения. Для оценки величины давления воды на индиевые столбы, возникающего при скрайбировании, экспериментально было определено усилие, необходимое для сдвига индиевого столба. В эксперименте механическое усилие прикладывалось ко всей боковой поверхности индиевого столба. Исследования показали, что в среднем давление, необходимое для смещения индиевого столба, изменялось от $1,5 \cdot 10^{-6}$ до $2,1 \cdot 10^{-6}$ кг/мкм². Таким образом, в результате проведённого исследования выяснено, что на расстояниях до 40 мкм от края канавки во время лазерного скрайбирования в водной среде давление на индиевый столб составляет не менее $1,5 \cdot 10^{-6}$ кг/мкм².

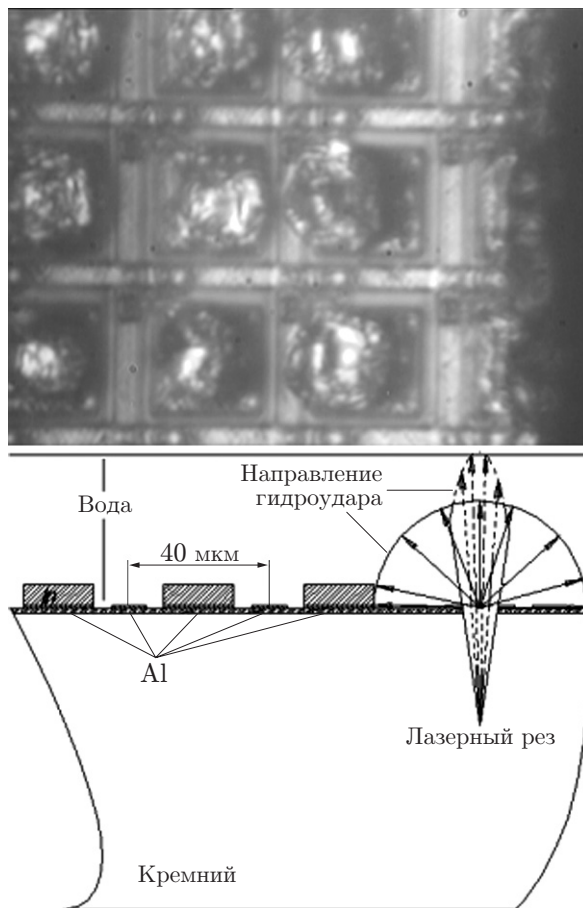


Рис. 7

Заключение. В данной работе выяснено, что за время действия одного импульса лазерного излучения (с длительностью, превышающей время выброса пара) имеет место многостадийное взаимодействие с полупроводниковыми материалами.

Исследована зона повреждения вокруг канавки в водной среде и на воздухе регистрацией изменений электрофизических параметров $p-n$ -переходов, расположенных на различных расстояниях от места воздействия лазерного излучения. Установлено, что быстрое охлаждение расплава водой значительно расширяет границы зоны повреждения по измерениям вольт-амперных характеристик $p-n$ -переходов, расположенных на разных расстояниях от канавки. Выяснилось изменение напряжения начала пробоя $p-n$ -перехода до и после лазерного скрайбирования. Уменьшение этого напряжения связано с возникновением так называемой области «мягкого» пробоя $p-n$ -переходов. При скрайбировании кремниевых СБИС в водной среде в сравнении с результатами скрайбирования на воздухе область повреждения увеличивается с 13 до 47 мкм.

На расстояниях до 40 мкм от края канавки во время лазерного скрайбирования в водной среде давление на индиевый столб составляет не менее $1,5 \cdot 10^{-6}$ кг/мкм².

Из-за отсутствия расплава на стенках канавки при скрайбировании в водной среде данный режим может быть использован для исследования слоистых структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Novoselov A. R., Klimenko A. G., Vasilyev V. V. Application of pulsed UV laser for dicing of arrays and linear of photodiodes based on MCT solid solution // Proc. SPIE. 2007. **6636**. 663619. DOI: 10.1117/12.742639.

2. Nilsson T., Wagner F., Richerzhagen B. Scribing of GaN wafer for white LED by water jet guided laser // Proc. SPIE. 2004. **5366**. P. 200–206.
3. Garcia B. J., Martinez J., Piqueras J. Laser melting of GaAs covered with metal layers // Appl. Phys. A. 1990. **51**, N 5. P. 437–445.
4. Карпов С. Ю., Ковальчук Ю. В., Погорельский Ю. В. Плавление полупроводников под действием импульсного лазерного излучения. Обзор // ФТП. 1986. **20**, вып. 11. С. 1945–1969.
5. Seeger K. Semiconductor Physics. Berlin, Heidelberg: Springer, 1989. 522 p.
6. Двуреченский А. В., Качурин Г. А., Нидаев Е. В., Смирнов Л. С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982. 208 с.
7. Heywang W., Krimmer E. F., Runge H. Annealing mechanism of radiation damage and dopants in pulsed laser light irradiated ion implanted layers // Phys. Status Solidi A. 1979. **51**, N 1. P. k79–k82.
8. Li H. Semiconductors Under Ultrafast Laser Excitation: Optical Studies of the Dynamics: Ph. D. thesis. Massachusetts, Cambridge: Harvard University, 1998. 201 p.
9. Brown W. L. Laser Processing of Semiconductors. Amsterdam: NorthHolland Publishing Company, 1983. 480 p.
10. Li H., Callan P. J., Glezer E. N., Mazur E. GaAs under intense ultrafast excitation: Response of the dielectric function // Phys. Rev. Lett. 1998. **80**, N 1. P. 185–188.
11. Fattahov Ya. V., Galyautdinov M. F., L'vova T. N., Khaibullin I. B. Real-time observation of local molten – phase nucleation on a semiconductor surface under powerful light irradiation // Journ. Phys.: Condenser Matter. 2000. **12**, N 25. P. L393–L397.
12. Lui X., Du D., Monrou G. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses // IEEE Journ. Quantum Electron. 1997. **33**, N 10. P. 1706–1716.
13. Rouse A., Rischel C., Fourmaux S. et al. Nonthermal melting in semiconductors measured at femtosecond resolution // Nature. 2001. **410**, N 1. P. 65–67.
14. Franghiadakis Y., Fotakis C., Tzaneyakis P. Energy distribution of ion produced by excimer-laser ablation of solid and molten targets // Appl. Phys. A. 1999. **68**, N 4. P. 391–397.
15. Hong M. H., Lui Y. Optical detection of laser plasma interaction during laser ablation // Proc. SPIE. 1999. **3618**. P. 61–70.
16. Grossa M. S., Blacka I., Müllerb W. H. Numerical testbed for laser materials processing // Proc. SPIE. 2002. **4631**. P. 254–263.
17. Semak V. V., Thomas J. G., Campbell B. R. Drilling of steel and HgCdTe with the femtosecond pulses produced by a commercial laser system // Journ. Phys. D: Appl. Phys. 2004. **37**, N 20. P. 2925–2931.
18. Новоселов А. Р. Разработка высокоэффективных мозаичных фотоприёмников на основе линеек фоточувствительных элементов // Автометрия. 2010. **46**, № 6. С. 106–115.
19. Пат. 2509391 РФ. Способ формирования граней чипа для мозаичных фотоприёмных модулей /А. Р. Новоселов. Оpubл. 10.03.2014, Бюл. № 7.
20. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 300 с.
21. Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Клименко А. Г. и др. Индиевые столбы для Flip-chip технологии матричных фотоприёмных устройств на основе плёнок Cd-Hg-Te, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2008. № 3. С. 60–63.

-
22. **Новоселов А. Р.** Способ уменьшения зазора между чипами в мозаичных фотоприёмных модулях // Автометрия. 2016. **52**, № 1. С. 116–121. DOI: 10.15372/AUT20160114.
 23. **Новоселов А. Р., Алдохин П. А., Маточкин А. Е. и др.** Оперативные методы контроля формы поверхностей компонент фотоприёмников flip-chip ИК-диапазона // Автометрия. 2019. **55**, № 2. С. 70–80. DOI: 10.15372/AUT20190208.

Поступила в редакцию 04.06.2020

После доработки 20.06.2020

Принята к публикации 13.07.2020
