

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 53.06

ЭФФЕКТ ФОРМИРОВАНИЯ
И ЗАПОЛНЕНИЯ ИНДИЕМ КАНАВОК В САПФИРЕ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯА. Р. Новоселов¹, А. Г. Клименко²

¹Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8

²Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: novoselov@oesd.ru
klimenko@isp.nsc.ru

В едином технологическом процессе под действием лазерных импульсов формируется канавка на нижней поверхности сапфира с нанесённым слоем индия, который заполняет канавку по мере её образования. Использован импульсный газовый лазер с длиной волны 0,337 мкм. Лазерный луч фокусировали сквозь сапфир на поверхность, покрытую индием. Скорость перемещения сапфира была равномерной, смещение сапфира за время между двумя импульсами составляло 10 % диаметра светового пятна. Для формирования канавки использовался режим сканирования (многократный проход лазерного излучения по канавке). Плотность энергии в импульсе за один проход была достаточно большой. Процесс проводился на воздухе. Выявлено, что оптимальными являются два прохода, когда удельное сопротивление индия в канавке лишь в 3,8 раза превышает удельное сопротивление чистого (99,999 %) брусков индия.

Ключевые слова: индий, сапфир, лазерное излучение.

Введение. В предлагаемой работе более полно, чем в [1], представлены результаты исследования формирования лазерным излучением индиевых дорожек внутри канавок в сапфире в одном технологическом процессе, что было осуществлено нами впервые. Мы полагаем, что речь идёт о новом эффекте в области импульсных лазерных технологий.

Для качественного описания физических процессов формирования канавок, заполненных индием, в сапфире нам понадобятся следующие справочные данные: температуры плавления и кипения индия (156,4 и 2024 °С) и сапфира (2046 и 2980 °С) [2]. Отметим, что на длине волны 0,337 мкм коэффициент пропускания сапфира составляет около 86 %, коэффициент поглощения — $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, энергия диссоциации молекулы Al_2O_3 — 740 ккал/моль, удельное сопротивление (ρ_0) чистого массивного индия (99,999 %) при комнатной температуре — $8,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/см}$.

Для исследования эффекта формирования и заполнения индием канавок в сапфире под действием лазерных импульсов использовалось расположение образца, аналогичное описанному в [3], когда лазерное излучение проходит сквозь прозрачную подложку, поглощается непрозрачным слоем, нанесённым на нижнюю поверхность подложки, вызывает его нагрев и образование пара материала. В [3] рассмотрен процесс удаления части непрозрачного слоя. Мы же поставили перед собой цель сформировать канавку в прозрачной подложке и заполнить её слоем непрозрачного материала в едином процессе. Прикладное

применение таких канавок с индием является достаточно важным для коррекции сапфировых плат с разводкой токопроводящих дорожек, обеспечивающих подвод напряжений к фотоприёмным устройствам, чувствительным в инфракрасном спектральном диапазоне длин волн. Фотоприёмные устройства с сапфировыми платами достаточно широко используются в системах тепловидения [4].

Эксперименты были проведены на оптически гладких плоскопараллельных пластинах лейкосапфира толщиной около 500 мкм, на нижней стороне которых нанесён слой индия. Лазерный луч сквозь сапфир фокусировали на поверхность с индием. Образец равномерно перемещали со скоростью около 120 мкм/с, смещение сапфира за время между двумя импульсами составляло 10 % диаметра светового пятна. Для формирования канавки использовали режим сканирования. Канавки длиной порядка 1 мм формировались за 1, 2, 5 и 10 проходов. Применялся импульсный газовый N₂-лазер, длина волны 0,337 мкм, длительность импульса 7 нс, частота повторения 100 Гц, плотность энергии в импульсе около 3,6 Дж/см². Эксперимент проводили на воздухе.

Перед измерением ширины, глубины канавок и электрического сопротивления индия внутри канавок излишки индия с поверхности легко удалялись, так как плавление индия происходит лишь в области взаимодействия излучения лазера с материалом (в области канавки).

В первом эксперименте индий наносили вакуумным напылением толщиной около 5,5 мкм. При формировании канавки за один проход излучением с плотностью энергии около 2,6 Дж/см² и более плёнка индия испарялась, на стенках канавки наблюдалось незначительное количество индия. Оптическая ось излучения совпадала с нормалью к поверхности лейкосапфира.

Во втором эксперименте при увеличении толщины индия до 50 мкм (индий накатывали роликом на поверхность сапфира) пары индия оставались в области их возникновения и был получен эффект заполнения индием формируемой канавки в сапфире.

В таблице приведены экспериментальные данные исследования. В первой серии опытов оптическая ось излучения совпадала с нормалью к поверхности лейкосапфира. Лазерный луч фокусировали изменением расстояния между линзой и образцом по максимальной светимости области взаимодействия. Расстояние между объективом и сапфиром в этой серии экспериментов постоянное. Во второй серии экспериментов сапфир располагался под небольшим углом к оптической оси излучения (около 5°), что позволяло при его перемещении получать разное расстояние от линзы до образца. Формировались канавки на нижней поверхности сапфира, где был нанесён слой индия, и рядом в тех же условиях контрольные канавки в области без индия.

Сравнив результаты экспериментов, можно сделать следующие выводы:

1. Найти оптимальное положение фокусировки удалось за счёт сдвига наклонённого образца, т. е. последовательного изменения расстояния до линзы, при этом плотность энергии составила около 3,6 Дж/см². В наших экспериментах при горизонтальном размещении образца плотность энергии была меньше. При максимальной фокусировке излучения заметно увеличилось сопротивление (с 16 до 93,3 Ом/мм), поэтому мы считаем, что плотность энергии при формировании канавок с индием должна быть меньше 3,6 Дж/см², но достаточной для образования канавки в сапфире.

2. При одном проходе края и дно канавки неровные, поэтому удельное сопротивление индия выше, чем при двух проходах, когда наблюдается сглаживание неровностей канавки.

3. Наименьшее сопротивление индия достигается при двукратном проходе, с каждым последующим проходом оно увеличивается.

**Результаты экспериментов по формированию в сапфире канавок
и заполнению их индием**

Эксперимент	Количество проходов	Ширина канавки, мкм	Глубина канавки, мкм	Сопротивление, Ом/мм	$\rho \times 10^{-6}$, Ом/см	ρ/ρ_0
Оптическая ось излучения совпадает с нормалью к поверхности лейкосапфира со слоем индия	1	23,5	2,0	16	75,2	9,2
	2	24,0	2,5	5,2	31,2	3,8
	5	26,0	4,0	13,4	139,4	17
	10	26,5	5,0	13,7	181	22
Сапфир со слоем индия расположен под углом около 5° к оптической оси излучения	1	15,0	2,5	93,3	350	42,7
	2	20,5	3	45,3	278,6	34
	5	23,5	4,5	34,1	361	44
Сапфир без индия расположен под углом около 5° к оптической оси излучения	1	13,5	2,0	—	—	—
	2	14,0	2,5	—	—	—
	5	14,5	4,0	—	—	—
	10	16,0	5,0	—	—	—

4. Ширина и глубина канавки в сапфире с индием больше по сравнению с поверхностью без индия.

Обсуждение результатов. В работах по скрайбированию полупроводниковых материалов [5, 6] предлагалось учитывать неравномерное распределение плотности энергии излучения в пределах пятна света на поверхности, что позволяет выделить три характерные кольцевые зоны: 1 — центральная область, в которой плотности энергии излучения достаточно для перехода материала в газообразное (парообразное) состояние; 2 — область, в которой плотность энергии выше порога плавления; 3 — область на краях пятна излучения, в которой плотность энергии меньше порога плавления. Ширина канавки не превышает размеров области 2. Из литературы известно, что с началом облучения поверхности материала в нём последовательно происходят следующие изменения: разрушение кристаллической структуры (области 1–3), плавление (области 1 и 2) и образование пара (область 1), выдавливающего расплав из области 2.

Рассмотрим случай использования сапфира без индия. Сапфир хорошо пропускает излучение. Известно, что процесс перегрева поверхности любого материала начинается на поверхностных дефектах [7] и постепенно расширяется [8]. Таким образом, создаются

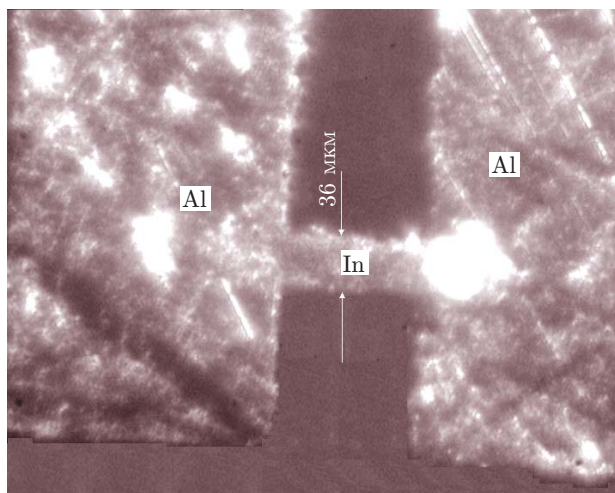
условия для поглощения энергии излучения в пределах светового пятна. В нашем случае ширина канавки на поверхности сапфира без индия составляла 13,5 мкм.

При облучении сапфира с индием происходит следующее. В начале облучения индий переходит в жидкое состояние, а затем в парообразное, при этом возрастает поглощение в пятне излучения на нижней грани сапфира. Вследствие того что теплопроводность паров индия на порядки меньше, чем у расплава и в твёрдом состоянии, уменьшается отток тепла в сторону холодного индия, способствуя плавлению и парообразованию в сапфире на большей площади (ширина канавки увеличивается на 1,5 мкм) в сравнении с сапфиром без индия. К моменту возникновения пара в сапфире индий на границе с сапфиром находится в парообразном состоянии в области 1 и расплавленном в области 2. Давление паров индия и сапфира действует на расплавленный слой индия, перемещая его в канавку. Изучение результатов экспериментов со слоем индия толщиной около 5,5 мкм показало, что, действительно, наблюдается движение расплава по стенкам канавки. При смещении светового пятна на части площади происходит охлаждение паров и расплава индия, взаимодействие его с кислородом, находящимся в объёме материала (из-за большой энергии диссоциации молекул Al_2O_3 , на наш взгляд, распад молекулы кажется маловероятным). Процесс повторяется с каждым последующим проходом излучения, при этом накапливается доля окисленного индия в канавке, увеличивая сопротивление индиевой токопроводящей дорожки.

В работе [9] утверждается, что окисленный индий всегда проводящий, а его удельное сопротивление в зависимости от условий окисления лежит в широком диапазоне (от 10^{-4} до 10^8 Ом/см). Индий с иглы кантилевера атомно-силового микроскопа, нагретой до температуры 500°C , переносился на образец на воздухе. По словам авторов, индий сильно окисляется и имеет удельное сопротивление около 10^4 Ом/см. В нашем случае приток атмосферного кислорода невозможен и время импульсного нагрева индия до температуры более 500°C сопоставимо с длительностью импульса. Результатом влияния этих факторов является низкое удельное сопротивление индия в канавках.

Полученные индиевые дорожки в сапфире могут быть большой длины (в нашем случае около 1 мм), их сопротивление не изменяется достаточно долго (сопротивление повторно измерено через 6 месяцев).

Прикладное применение описанного процесса заключается в возможности формирования лазерным излучением новых межсоединений для двух контактных площадок (коррекция элементов разводки токопроводящих дорожек). На рисунке показано соединение



двух алюминиевых контактных площадок на сапфире, проведённое по данной технологии. Фотография сделана сквозь сапфир.

Заключение. В предлагаемой работе исследован эффект заполнения индием канавок в сапфире под действием лазерного излучения. Указаны условия, при которых под действием лазерных импульсов в едином технологическом процессе формируется канавка на поверхности сапфира и заполняется расплавом индия.

Выявлено, что два прохода образца со скоростью 120 мкм/с под излучением являются оптимальным условием, при котором удельное сопротивление индия в канавке лишь в 3,8 раза превышает удельное сопротивление чистого (99,999 %) брускового индия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Новоселов А. Р., Клименко А. Г.** Формирование лазерным излучением токоведущих дорожек на сапфировой плате межсоединений для ИК ФПУ // Тр. XXII Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: ОАО «НПО "Орион"», 2012. С. 182–183.
2. **Таблицы физических величин:** Справочник /Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.
3. **Bovatsek J., Tamhankar A., Patel R. S. et al.** Thin film removal mechanisms in ns-laser processing of photovoltaic materials // Thin Solid Films. 2010. **518**, Is. 10. P. 2897–2904.
4. **Chamonal J. P., Mottin E., Audebert P. et al.** Long linear MWIR and LWIR HgCdTe arrays for high resolution imaging // Proc. SPIE. 2000. **4130**. P. 452–462.
5. **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.
6. **Новоселов А. Р.** Разработка высокоэффективных мозаичных фотоприёмников на основе линеек фоточувствительных элементов // Автометрия. 2010. **46**, № 6. С. 106–115.
7. **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.: Condensed Matter. 2000. **12**, N 25. P. L393–L397.
8. **Зенгуил Э.** Физика поверхности. М.: Мир. 1990. 536 с.
9. **Nelson B. A., King W. P., Sheehan P. E., Whitman L. J.** Direct deposition of continuous metal nanostructures by thermal dip-pen nanolithography // Journ. Appl. Phys. Lett. 2006. **88**, Is. 3. 033104.

Поступила в редакцию 11 апреля 2013 г.