

ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСВАРКА В ЭЛЕКТРОНИКЕ: ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Лазерная микросварка открывает перспективы создания микроэлектронных приборов нового поколения, материалов и покрытий, обладающих повышенными трибологическими свойствами. Для пользователя решающее значение имеет скорость производственного процесса, для исследователя – повышение технологической прочности. Часто решения этих двух задач взаимно противоположны друг другу. Индивидуальный подбор режимов позволит сделать оптимальный выбор.

Тенденции к уменьшению размеров, массы изделий современных микроэлектронных устройств и повышение требований к качеству продукции приводят к новым решениям. Техническая сборка микро- и наносистем базируется на эффектах, возникающих при синтезе материалов методами лазерного воздействия [1]. Причем современный инструментарий позволяет прецизионно воздействовать на объекты. Лазерные и оптические технологии селективно воздействуют на материалы, используя особенности их энергетических спектров. Это расширяет возможности создания материалов и покрытий с заданными функциональными свойствами.

В условиях гибридной лазерно-плазменной обработки материалов возникает особый тип разряда – комбинированный лазерно-дуговой. Он отличается своими свойствами от обычной плазменной дуги и оптического разряда, поддерживаемого лазерным излучением [2]. И это подтверждают результаты математического моделирования процессов взаимодействия сфокусированного лазерного луча с плазмой столба сжатой электрической дуги.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

При разработке технологии лазерной сварки деталей микроэлектронных изделий учитывалось требование создания

качественного контура сварки, покрытие места сварки, условия подачи технологического газа. С учетом геометрических, оптических и энергетических параметров лазерного зонда в ходе многочисленных экспериментов были найдены оптимальные параметры режимов. Так, диаметр лазерного луча на поверхности свариваемых деталей составляет величину порядка $d_c = 0,3$ мм.

Величина максимальной глубины a_{\max} проплавления определяется из тепловых условий [3] как:

$$a_{\max} = \frac{d_c}{4} \left(\frac{T_b}{T_m} - \frac{T_m}{T_b} \right) =$$

$$= \frac{0,3}{4} \left(\frac{2820}{1450} - \frac{1450}{2850} \right) = 0,105 \text{ мм,}$$



Рис.1 Пружинный держатель магнитной головки накопителя (готовое изделие после сборки лазерной сваркой)

где T_m, T_b соответствуют температурам плавления и кипения системы. Оказалось, что полученное значение a_{max} превышает требуемую глубину проплавления верхней детали на 0,05 мм и плюс 0,05 мм нижней детали, имеющей толщину 0,08 мм.

Удельная мощность излучения q_0 в центре пятна нагрева определяется исходя из неравенства

$$q_0 \geq \frac{4,88 \cdot K_\lambda \cdot T_b}{d_c} = 1,24 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2,$$

где K_λ [Вт/(см·К)] – теплопроводность. Время, требуемое для достижения температуры T_b в зоне сварки, определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} \tau_{u \min} &\geq \frac{0,79}{a} \left(\frac{K_\lambda \cdot T_b}{q_0} \right)^2 = \\ &= \frac{0,79}{0,21} \left(\frac{0,27 \cdot 2820}{1,24 \cdot 10^5} \right)^2 = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \end{aligned}$$

где a – коэффициент температуропроводности, см²/с. Установка "Квант-15", оптическая схема которой представлена в [3], имеет минимальную длительность импульса $1,5 \cdot 10^{-3}$ с, поэтому удельная мощность излучения будет равна $0,4 \cdot 10^5$ Вт/см². Тогда энергия импульса проплавления составит величину порядка

$$E_u \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} q_0^4 \cdot \tau_m = 0,15 \text{ Дж}.$$

Учитывая потери энергии лазерного излучения на отражение $K_{отр}$ от полированных поверхностей детали (для $\lambda = 1,06$ мкм, для сталей $K_{отр} = 0,63-0,75$), потери в оптической системе резонатора лазера $K_{си}$, потери, обусловленные конструктивными особенностями свариваемых деталей $K_{констр} \approx 0,80-0,95$ и принимая во внимание зависимость энергетических потерь E_p от коэффициента потерь $K_{опт}$ в оптической системе резонатора лазера

$$E_p = \frac{E_u \cdot K_{констр}}{(1 - K_{отр}) \cdot K_{опт}}$$

$$K_{опт} = (1 - K_{стек})^n \cdot (1 - \alpha_{погл})^m \cdot (1 - K_{си}),$$

где $K_{стек}$ – коэффициент отражения лазерного излучения от поверхности стекла, $K = 0,045$; $K_{си}$ – коэффициент потерь энергии лазерного излучения в системе индикации лазера, $K_{си} \approx 0,08$; $\alpha_{погл}$ – коэффициент поглощения энергии излучения стеклом, $\alpha_{погл} \approx 0,06$; n – количество отражающих поверхностей (для установки "Квант-15" $n = 6$); m – приведенная толщина стекол оптической системы лазера (для "Квант-15" $m = 4$ см), получаем, что $K_{опт} = 0,54$, а $E_p = 1,06$ Дж.

Однако натурные эксперименты при сборке пружинного держателя магнитной головки накопителя (рис.1) лазерной сваркой показали, что соединение формируется с малым

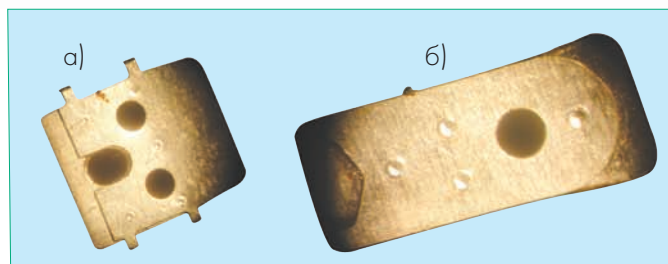


Рис.2 Лазерная сварка: а) коромысла с пластиной пятью точками; б) пружины с коромыслом четырьмя точками

проплавлением нижней детали подвески. Причина крылась в неплотном прилегании верхней детали и увеличении скорости стока теплоты в более толстую нижнюю деталь по сравнению с расчетом. Увеличение длительности импульса до 4 мс дало положительный результат. Пересчет удельной мощности излучения при увеличении времени τ_m до 4 мс дал следующие оценки:

$$\begin{aligned} q_0^y &= \frac{0,885 \cdot K_\lambda \cdot T_b}{\sqrt{a \cdot \tau_m^y}} = \frac{0,885 \cdot 0,27 \cdot 2820}{\sqrt{0,21 \cdot 0,004}} = \\ &= 2,29 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_u^y &= \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} q_0^y \cdot \tau_m^y = \\ &= \frac{3,14 \cdot 0,03^2}{4} \cdot 2,29 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,65 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{E_u^y \cdot K_{констр}}{(1 - K_{отр}) \cdot K_{опт}} = \frac{0,65 \cdot 0,95}{(1 - 0,75) \cdot 0,54} = \\ &= 4,57 \text{ Дж} \approx 5 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Установка "Квант-15" позволяет обеспечивать параметры режима лазерной сварки: $d_c = 0,3$ мм, $E_p \approx 5$ Дж, $\tau_u = 4 \cdot 10^{-3}$ с при фокусном расстоянии объектива 50 мм и расходе аргона 0,5–0,7 л/с.

Пружинный держатель магнитной головки состоит из коромысла, пружины и пластины. Коромысло и пружина изготовлены из стальной ленты марки 18ХНФГС толщиной 0,08 мм и 0,05 мм соответственно. Пластина изготовлена из ленты марки 12Х18Н10Т толщиной 0,5 мм. Коромысло соединяется с пластиной пятью сварными точками, а пружина с коромыслом – четырьмя (рис.2). Основным конструктивным параметром – диаметр сварных точек должен быть не менее 0,3 мм согласно конструкторским требованиям. Оптимальный режим лазерной сварки при отработке технологии (табл.1) определяли из условия получения сварной точки заданного диаметра и по результатам испытаний на разрыв (вырыв сварной точки). Анализ данных, представленных в табл.1, показал, что режимы 9 и 10 обеспечивают требуемое качество сварного соединения и необходимый уровень прочности при разрыве. Методика была интегрирована в производство заказчика.

Таблица 1. Режимы лазерной сварки деталей пружинного держателя на установке "Квант-15"

Режим №	Соединяемые детали	Напряжение заряда, U, В	Время импульса, t, мс	Диаметр сварной точки, d, мм
1	Пластина и коромысло	400	2,5	0,18
2		420	2,5	0,18
3		440	2,5	0,20
4		460	2,5	0,22
5		480	2,5	0,24
6		500	2,5	0,25
7		400	4,0	0,28
8		420	4,0	0,29
9		440	4,0	0,30
10		460	4,0	0,32
11		480	4,0	0,32
12		500	4,0	0,32
1	Коромысло и пружина	350	2,5	0,18
2		370	2,5	0,19
3		390	2,5	0,21
4		410	2,5	0,22
5		430	2,5	0,23
6		450	2,5	0,24
7		350	4,0	0,28
8		370	4,0	0,28
9		390	4,0	0,29
10		410	4,0	0,31
11		430	4,0	0,31
12		450	4,0	0,32

ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСВАРКА ТЕРМОЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОВОЛОК

При отработке технологии лазерной микросварки термоэлектродных жил (рис.3) кабелей диаметром от 1,6 до 6,0 мм приходилось учитывать особенности сборки конструкции. Дело в том, что необходимо строго придерживаться определенной последовательности операций. Сначала заготовка позиционируется в манипуляторе сварочной установки, зажимается в медной цанге, при этом кабель необходимо расположить под углом 60° и зажать жилы пинцетом. Далее следует включить подачу защитного газа аргона под давлением не менее 0,1 МПа при полностью открытом вентиле ротаметра. А затем одиночными импульсами сварить жилы термоэлектродов с двух сторон, не разжимая пинцета. Были отработаны режимы микросварки, когда, наблюдая в телескоп оптической системы (СОК-1), производили полную расфокусировку лазерного излучения. Одиночные импульсы, оплавливая жилы термоэлектродов, обеспечивают плавные переходы при отсутствии утяжек, подрезов или уменьшения поперечного сечения жил в месте сварки. После этого подачу аргона прекращают.

Оплавленные концы жил не должны иметь пор, раковин, трещин, кратеров, прожогов и шлаковых включений. Ширина

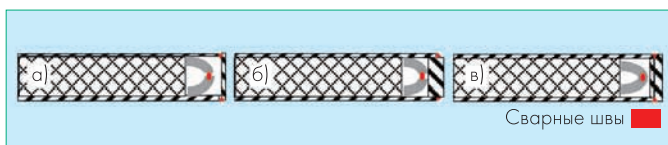


Рис.3 Типы сварных соединений термоэлектродных жил кабелей: а) кабель с плоским доньшком – соединением встык; б) кабель с внутренним цилиндрическим доньшком – соединение в угол; в) кабель с доньшком в виде пробки –соединение встык

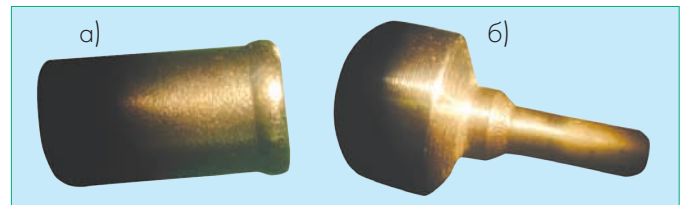


Рис.4 Лазерная микросварка: а) герметизация термокабелей; б) сварка корпуса кабеля со штуцером

перемычки между термоэлектродами должна быть не меньше диаметра термоэлектродных жил. Качество сварки проверяется на микроскопе МБС-9 при восьмикратном увеличении. Проверку электрического контакта между термоэлектродами и величины электрического сопротивления пары термоэлектродных жил на соответствие техническим условиям проводят по стандартизированной методике.

ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСВАРКА ОБОЛОЧКИ С ДОНЫШКОМ

Выбор режимов лазерной сварки проволочных термопар и крышек кабелей (рис.4) определялся условиями, чтобы в зоне замка не образовывался кратер. Методика операции предусматривала предварительное измерение электрического сопротивления изоляции между термоэлектродными жилами и сопротивления между жилами и оболочкой кабеля непосредственно перед лазерной микросваркой оболочки с доньшком. Электрическое сопротивление должно быть не менее 10⁹ Ом.

Установив заготовку термопреобразователя в медный цанговый теплоотвод сварочного манипулятора, ее зажимали, чтобы расплавить дно с оболочкой кабеля по всему периметру. При этом необходимо контролировать величину вылета оболочки кабеля над плоскостью зажимной медной цанги, которая должна соответствовать стандарту. Для этого сварку производят в два прохода: первый проход – сварка в режиме одиночного импульса до образования спая, второй проход – переход на частотный режим для осадки спая по высоте (частота следования импульсов излучения – 2,5 Гц). Были найдены оптимальные значения угла α поворота оси термопары относительно лазерного луча.

При проведении микросварки поддерживали постоянную скорость расхода аргона, 0,8–1,0 л/мин, которую контролировали по редуктору-расходомеру АР-10. Использование сварочной проволоки марки Св-40Х23Н32С2Р в качестве материала доньшек для термоэлектродов обеспечивает высокую стойкость изделия к образованию горячих трещин. Известно, что величиной энергии выходного излучения лазера можно управлять выбором зарядного напряжения. Поэтому при выборе условий предотвращения образования кратера в зоне замка, чтобы исключить подплавление оболочки термокабеля, следует плавно поворачивать ручку верньера зарядного напряжения. В табл.2 приведены разработанные режимы микросварки.

Таблица 2. Параметры режимов лазерной сварки проволочных термопар и крышек кабелей КТМС (КТМСп) ХА (ХК)

Марка кабеля	Марка, диаметр оболочки и электрода	Тип крышки	Тип соединения	U_3 , В	$\tau_{ц}$, мс	Деления шкалы фокусировки луча F	α , град	Скорость вращения стола с изделием $V_{св}$, об/с
КТМС ХК	Сталь 12Х18Н10Т $d = 3 \cdot 10^{-3}$ м Хромель-алюмель $d_э = 6 \cdot 10^{-4}$ м	1	1	450–500	4	15	60	180
			Встык	500–600 ^{а)}	4	15	45	
КТМСп ХА	Сталь 10Х23Н18Т $d = 5 \cdot 10^{-3}$ м Хромель-алюмель $d_э = 7 \cdot 10^{-4}$ м	1–3	1–3	500–550	4	20	60	120
			Встык	650–700 ^{а)}	4	20	45	
КТМСп ХА	Сплав ХН45Ю $d = 5 \cdot 10^{-3}$ м Хромель-алюмель $d_э = 7 \cdot 10^{-4}$ м	1–3	1–3	550–600 ^{б)}	4	20	60	60
			Встык	700 ^{а)}	4	20	45	

Особые условия: а) сварка в режиме двух проходов; б) донышки для термоэлектродов выполнить из сварочной проволоки марки Св–40Х23Н3С2Р.

СОЗДАНИЕ ПОКРЫТИЙ С ВЫСОКОЙ МИКРОТВЕРДОСТЬЮ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ МЕТОДАМИ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ

Из опыта известно, что лазерными методами на поверхности деталей, уязвимых к износу и воздействию агрессивных сред, наносят особые покрытия. Поиск оптимальных параметров технологий плазменной наплавки нацелен на создание материалов покрытий. Замечено, что замена никеля железом в качестве основы металлматричного композита (ММК) приводит к повышению износостойкости материала и снижению себестоимости работ. Нами предложена технология нанесения износостойких покрытий (рис. 5) на основе порошковых смесей карбида вольфрама и легированной стали.

Экспериментальный комплекс для нанесения покрытий плазменной наплавкой представлен на рис.6. Плазменная горелка направлена на стальную подложку. При этом в плазменную дугу подаются два порошка: карбида вольфрама и легированной стали при разном процентном соотношении. Дисперсность порошковых частиц составила величину порядка 100 мкм. Смесь порошков, пройдя сквозь дугу, осажается плазмой на поверхности подложки и образует на ней расплав с твердыми включениями порошка карбида вольфрама. Процесс наплавки осуществляется в защитной атмосфере аргона.

После кристаллизации получаемый композит представляет собой металлическую матрицу с внедренными твер-

Таблица 3. Расчетные значения физических и трибологических свойств фаз, входящих в микроструктуру ММК [6,7]

Фаза	Уровень Ферми E_F, R_y	Количество валентных электронов	Термо-ЭДС, $(\text{мкВ/К}) \times 10^{-9}$	Энергия связи $E_{\text{связ}}, \text{эВ}$	Микротвердость $H, \text{ГПа}$	Износостойкость, I_{rel}
WC	0,82813	3,615030	3,498	-10,811	24,18164	339,0266
Мартенсит	0,65563	45,818767	10,177	-2,017	8,30073	116,3762
FeW_3C	0,53916	8,613941	8,713	-2,665	10,43855	146,3485
$\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$	0,23304	13,148611	5,542	-4,729	15,25833	213,9217
$\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$	0,38983	3,007727	5,999	-4,236	14,77149	207,0962

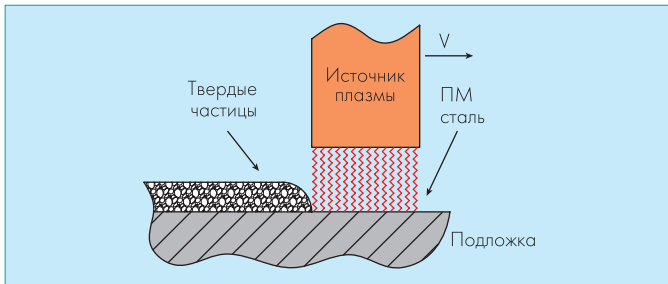


Рис. 5 Структурная схема процесса наплавки

дыми частицами. Также были исследованы образцы, в которых к базовой смеси добавлялось 2–3% Ti. Оборудование и структурная схема наплавки, характеризующая технические условия проведения процесса, представлены в работе [4]. Изучение фазовых переходов методом рентгеноструктурного анализа [5] позволило установить структуры, которые образуются в условиях описываемого процесса. Анализ показал существование системы Fe-W-C-Ti – монокарбид вольфрама, имеющей гексагональную структуру (тип WC), частично трансформируемой в двойной карбид FeW_3C (структуру Лавеса), который затем, в условиях дефицита углерода, переходит в фазы $\eta_1\text{-Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $\eta_2\text{-Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ (тип сверхструктуры $E9_3$).

Пока исследователи не имеют полного представления о структурных характеристиках и свойствах продуктов химических реакций в изучаемой системе Fe-W-C-Ti . Для структурных фаз, обнаруженных в композите, были выполнены теоретические расчеты параметров электронной структуры и определены физические свойства. Это позволило на первом этапе

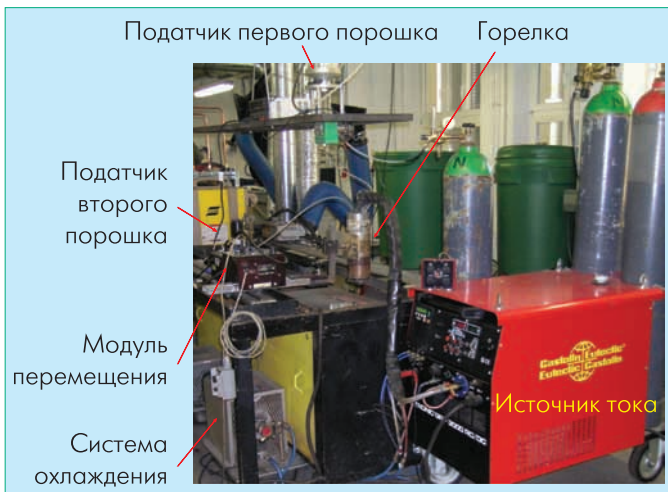


Рис. 6 Экспериментальный комплекс для нанесения покрытий методом плазменной наплавки

провести расчет микротвердости и износостойкости отдельных фаз, входящих в микроструктуру покрытия. А затем – для самой микроструктуры ММК произвели оценку трибологических свойств (табл.3). Расчетные значения согласуются с положениями, которые и раньше находили экспериментальное подтверждение: чем меньше величина термо-ЭДС, тем выше микротвердость и износостойкость; при уменьшении величины энергии связи, взятой по модулю, снижаются микротвердость и износостойкость.

Как известно [8], при лазерной наплавке перед технологами часто встают две задачи, решения которых взаимно противоположны друг другу: повышение производительности процесса и повышение технологической и эксплуатационной прочности. Отметим, что повышение функциональных свойств изделий предполагает большой объем исследовательских работ по изучению микро- и макроструктуры как в объеме наплавленных слоев, так и на границе с поверхностью детали. Сотрудники регионального ЦКП "ЛиОТ" ЮФО открыто делятся своими разработками, проводят консультационную работу с представителями промышленных предприятий региона, демонстрируя уникальное аналитическое и технологическое оборудование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kovalenko V. Laser micro and nano manufacturing. – Proceeding of the Fifth Int. Conf. "Beam Technologies & Laser Application", Sept., 2006, Saint-Peterburg, Russia.
2. Кривцун И. Гибридные лазерно-плазменные процессы обработки материалов и интегрированные плазмотроны для их реализации. – Proceeding of the Fifth Int. Conf. "Beam Technologies & Laser Application", Sept., 2006, Saint-Peterburg, Russia.
3. Технологические лазеры. Справочник.Т.1.
4. Илясов А., Рыжкин А., Илясов В. Технология ремонта, восстановления деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. –Материалы 9-й Междунар. практ. конф.-выставки: в 2 ч. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2007.
5. Илясов А., Рыжкин А., Илясов В. Особенности фазообразования при кристаллизации расплава системы Fe-W-C после осаждения в потоках плазмы. – Физика и химия обработки материалов, 2007, № 4.
6. Илясов В. Физическая модель износостойкости металломатричных композиционных материалов. – Вестник ДГТУ. 2008, т. 8, № 2.
7. Илясов А. Электронная структура и химическая связь в карбидах, кристаллизующихся в системе Fe-W-C.– Журнал структурной химии, 2008, т. 49, № 5.
8. Григорянц А., Мисюров А., Шиганов И. и др. Исследование технологических особенностей лазерной объемной наплавки. – Proceeding of the Fifth Int. Conf. "Beam Technologies & Laser Application", Sept., 2006, Saint-Peterburg, Russia.