

## ЛАЗЕРНАЯ ПАЙКА И МИКРОСВАРКА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь*

Воздействие лазерным излучением в виде сфокусированного луча создает высокую концентрацию энергии ( $10^8$ – $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) на поверхности материалов, что обеспечивает локальный нагрев с высокой скоростью и незначительной зоной термического влияния. Проблемы формирования микросоединений при лазерном воздействии связаны с необходимостью определения плотности мощности излучения, выбора оптимальных режимов, обеспечения заданного качества соединений. Энергетический баланс лазерного воздействия описывается уравнениями [1]:

$$E_{\text{л}} = E_{\text{погл}} + E_{\text{отр}}, \quad E_{\text{погл}} = E_{\text{ж}} + E_{\text{т}}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{л}}$  – энергия лазерного луча в зоне обработки;  $E_{\text{погл}}$  – энергия, поглощенная в процессе фотонно-электронных соударений;  $E_{\text{отр}}$  – энергия, отраженная от поверхности;  $E_{\text{ж}}$  – полное теплосодержание расплавленного металла;  $E_{\text{т}}$  – энергия, отводимая теплопроводностью в глубь основного металла.

Интенсивность лазерного излучения, проникающего в материал, убывает по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 k \cdot e^{-\gamma \cdot x}, \quad (2)$$

где  $x$  – глубина проникновения,  $I_0$  – интенсивность лазерного излучения на поверхности,  $k$  – коэффициент поглощения,  $\gamma$  – степень поглощения.

В металлах кванты света поглощаются в основном электронами проводимости, которые рассеивают поглощенную энергию на тепловые колебания решетки за время  $10^{-11}$ – $10^{-10}$  с, благодаря чему поглощенная энергия быстро переходит в теплоту. Степень поглощения для металлов порядка  $10^7$  м<sup>-1</sup>, поэтому энергия выделяется в слое толщиной около  $10^{-7}$  м и лазерное излучение можно рассматривать как локальный источник тепловой энергии на поверхности. Размер нагретой зоны на первом этапе определяется глубиной проникновения излучения в среду, а затем растет за счет теплопроводности. С ростом температуры поверхности значение коэффициента поглощения увеличивается и составляет для металлов при температуре 500°C и длине волны излучения 1,06 мкм 0,35–0,40, что дает возможность нагревать их поверхность с возрастающей скоростью.

При импульсно-периодическом лазерном воздействии процесс нагрева тела описывается непрерывно действующим источником теплоты, который представляется в виде серии действующих друг за другом мгновенных источников теплоты. Количество теплоты, введенное в обрабатываемую поверхность за время  $t$ , равно

$$Q = \int_0^{\tau_{\text{и}}} \eta P(t) dt, \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{и}}$  – длительность импульса,  $\eta$  – КПД лазерного нагрева;  $P$  – мощность лазерного излучения.

Плотность мощности лазерного воздействия зависит в значительной степени от диаметра луча  $d$ :

$$E = \frac{4W}{\pi \cdot d^2 \cdot \tau_{\text{и}}}, \quad (4)$$

где  $W$  – энергия в импульсе, которая для плавления материала без выплеска равна

$$W = \frac{0,885 T_{\text{пл}} \cdot \lambda \cdot \pi \cdot r^2}{\sqrt{a \cdot \tau_{\text{и}}}}, \quad (5)$$

где  $T_{пл}$  – температура плавления материала;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $a = \lambda / c\gamma$  – коэффициент температуропроводности ( $c\gamma$  – объемная теплоемкость);  $r$  – радиус пучка лазерного излучения.

Для импульсного лазерного источника энергия  $W$  находится в пределах  $10^2$ – $10^3$  Дж. Теоретически рассчитана зависимость величины поглощаемой энергии лазерного излучения от радиуса луча в зоне формирования соединений лазерной микропайкой и сваркой (рис. 1). При радиусе луча 2 мм величина поглощаемой энергии отличается почти вдвое.

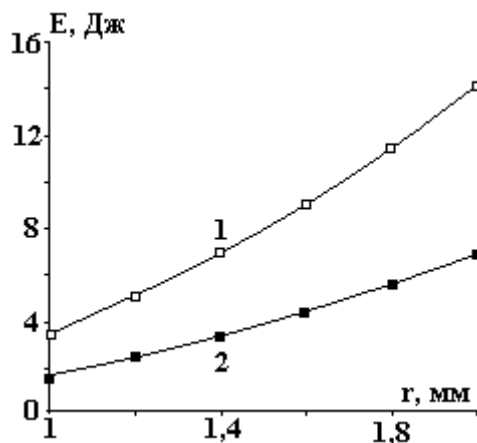


Рис. 1. Зависимости величины поглощенной энергии лазерного излучения от радиуса луча и типа соединения: 1 – сварка, 2 – микропайка

При лазерном нагреве сфокусированным излучением в виде отдельного импульса температурное поле может быть представлено в виде процесса распространения теплоты мгновенного линейного источника с энергией  $Q$ , выделившейся в пластине с равномерным распределением по толщине в начальный момент времени  $t = 0$ :

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi \cdot \lambda \cdot \delta \cdot t} e^{-\frac{r^2}{4at} - bt}, \quad (6)$$

где  $r$  – расстояние от источника теплоты до точки с координатами  $(x, y)$ ;  $\delta$  – толщина пластины;  $b = 2\alpha / (c\gamma \cdot \delta)$  – коэффициент температуропередачи, учитывающий поверхностную теплоотдачу в окружающую среду ( $\alpha$  – коэффициент полной поверхностной теплоотдачи).

Приращение температуры в любой момент времени при нагреве импульсным источником лазерного излучения определяется следующим образом:

$$dT = \frac{q \cdot dt}{4\pi \cdot \lambda \cdot \delta \cdot t} \cdot e^{-\frac{r^2}{4at}}. \quad (7)$$

Используя выражение (7), можно рассчитать температуру в произвольной точке поверхности при воздействии на нее лазерного излучения. Для периодического лазерного воздействия процесс нагрева описывается в виде серии непрерывно действующих мгновенных источников теплоты.

Для одного такого мгновенного источника теплоты получено выражение, описывающее изменение температуры  $T_t$  в зоне нагрева в 3-мерном пространстве [2]. Моделирование процесса нагрева лазерным излучением контактных групп из БрБ2 с помощью прикладного математического программного пакета MathCAD 7 Pro по данному выражению позволило получить зависимость изменения температуры нагрева за время воздействия лазерного излучения в виде совокупности температурных импульсов (рис. 2). Граничные условия моделирования: длина волны излучения – 1,06 мкм, частота следования импульсов – 10 Гц, длительность импульса – 0,1 с, длительность процесса – 1,0 с, КПД лазерной установки – 0,25. Анализ зависимости показывает, что для расплавления данного материала без учета теплообмена с окружающей средой достаточно двух импульсов, а с учетом – трех импульсов. Данная модель не учитывает зависимости изменения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности от роста температуры, поскольку для процессов пайки эти изменения не столь существенны.

Устройство лазерного формирования контактных соединений (рис. 3) состоит из источника оптического излучения 1, блоков регулирования энергии излучения 2, питания БП и управления БУ, оптической системы 5 и системы охлаждения лазера. В качестве источника оптического излучения

применен квантовый генератор на алюмоиттриевом гранате с неодимом с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульсов 0,1 с и частотой следования 1–50 Гц. Для накачки активного элемента использована ИК-лампа мощностью 2 кВт. Энергия импульса лазерного излучения составляла 0,75 Дж при напряжении на лампе накачки 900 В и частоте импульсов 3 Гц, а средняя мощность излучения в импульсе – 3,75 кВт.

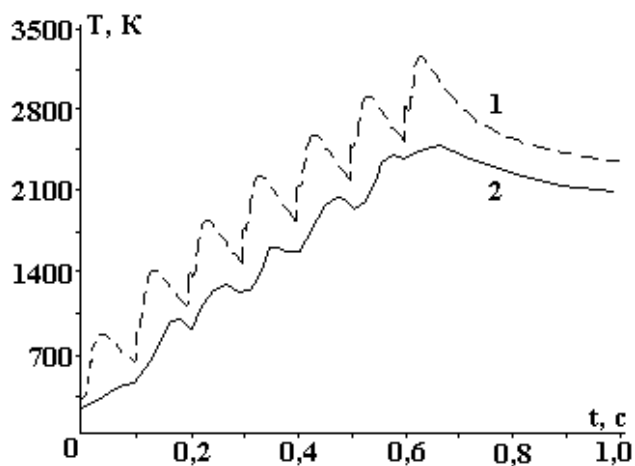


Рис. 2. Температурные циклы в зоне нагрева импульсного лазерного излучения: 1 – без учета теплообмена, 2 – с учетом теплообмена

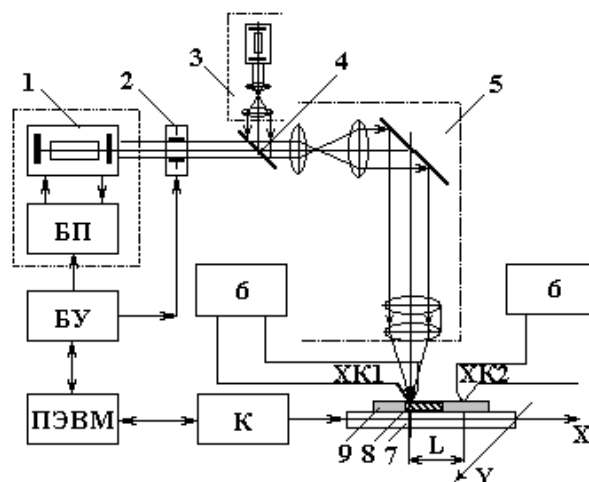


Рис. 3. Схема лазерной установки

Оптическая система 5 формировала пространственные характеристики пучка как инструмента обработки. Фокусное расстояние оптической системы составляло 150 мм. Для наводки оптического излучения и юстировки оптической системы использовался маломощный газовый лазер 3, излучение от которого вводилось в оптическую систему формирования лазерного излучения с помощью полупрозрачного зеркала 4. Для позиционирования изделий 8, 9 применен координатный стол 7 с двумя степенями свободы и точностью позиционирования  $\pm 0,1$  мм. Управление работой лазера и координатного стола организовано от ПЭВМ с помощью контроллера К. В установке применена двухконтурная система охлаждения лазера с теплообменным устройством типа «вода-вода» с термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру при помощи жидкостного насоса УО-1.

Плотность лазерного излучения определялась косвенным путем по температуре нагрева поверхности с помощью радиометра и двух измерителей температуры 6. Радиометр представлял собой печатную плату с металлизированным отверстием 8, в котором закреплена термопара типа ХК с помощью теплопроводящего клея в глухом отверстии с обратной стороны платы. Прибор MASTECH MV64 6 регистрировал температуру с точностью  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  в диапазоне от 0 до  $1000^{\circ}\text{C}$ . Температура нагрева контактных площадок и безвыводных элементов (резисторов, конденсаторов) измерялась термопарой, закрепленной в сквозном отверстии легкоплавким припоем. Для определения влияния лазерного излучения на термочувствительные элементы в зоне воздействия лазерного луча и на расстоянии  $L$  от нее размещались две термопары типа ХК, подключенные к разным измерителям температуры.

При средней мощности излучения в импульсе 3,75 кВт и энергии излучения до 2 Дж температура  $300^{\circ}\text{C}$  в зоне взаимодействия при диаметре пятна излучения 3 мм и частоте импульсов 10 Гц достигалась за 1–2 с.

Исследовался процесс лазерной пайки ИМС в корпусах с планарными выводами типов 401.14, 402.16, а также матричных БИС (МАБИС) серии КА1843, имеющих 108 выводов с шагом 0,625 мм на контактные площадки двусторонних печатных плат. Мощность лазерного излучения регулировалась в пределах 20–120 Вт путем изменения тока поджига. Нестабильность мощности излучения была не более 3%, нестабильность размеров пятна на выводах ИМС – не более 3,5% [3]. Координатный стол с помощью шаговых двигателей обеспечивал позиционирование выводов ИМС относительно луча не хуже  $\pm 0,1$  мм с нестабильностью скорости перемещения не более 2,5%. Скорость перемещения платы программировалась и автоматически менялась в соответствии с программой. Фиксация коваровых выводов относительно контактных площадок обеспечивалась магнитной системой, расположенной под печатной платой и создающей магнитное поле с напряженностью  $(16\text{--}20)\cdot 10^4$  А/м, которое обеспечивало фиксацию ИМС и МАБИС. Для наблюдения использована

малогабаритная телевизионная система на базе телевизора «Электроника-100», формирующая увеличенное в 15 раз изображение рабочей зоны. Это исключило необходимость прямого наблюдения через окуляр оптической системы СОК-1, а также повысило удобство работы и безопасность оператора.

Подготовка выводов включала их формовку, опрессовку припоем ПОС 61 диаметром 0,4 мм, для других партий на места будущих паяк через трафарет наносилась паяльная паста ПЛ-1 с содержанием припоя по массе 75% и максимальным диаметром частиц до 150 мкм. В процессе исследований диаметр луча изменялся в пределах 1–2,5 мм, скорость перемещения платы – 4–20 мм/с. Качество паяных соединений оценивали с помощью микроскопа МБС-2 при увеличении  $32^{\times}$ . Результаты исследований качества паяных соединений показали, что хорошее качество соединений достигается в случае напаянного припоя при мощности 26 Вт и скорости 4 мм/с, а для пасты – при 24 Вт и 7 мм/с. Применение паяльной пасты снизило требуемую мощность энергии излучения. При пайке также важно обеспечить надежное контактирование всех выводов ИМС с контактными площадками платы, в противном случае нанесенный припой оплавится вокруг вывода, а контакт с платой отсутствует. Тепловой режим, устанавливаемый в зоне пайки, зависит как от мощности лазерного излучения, скорости перемещения луча и его диаметра, так и от количества вносимого в зону пайки припоя. При толщине наносимой паяльной пасты свыше 200 мкм в результате ее разбрызгивания на поверхности платы образуются шарики припоя и перемычки между выводами ИМС. Установлена определенная зависимость массы расплавленной пасты припоя от времени и мощности лазерного излучения. Так, для скорости перемещения 4 мм/с и мощности лазера до 30 Вт масса расплава не превышает 2–3 мг в соединении. Увеличение мощности излучения с целью более полного расплавления всей нанесенной пасты приведет к повреждению диэлектрика платы. Отмечена также нестабильность характеристик лазерного излучения в течение длительного срока работы, которая возрастает с увеличением мощности.

Оптимальными режимами процесса лазерной пайки, при которых обеспечивается высокое качество соединений лазерного излучения, и которые не оказывают отрицательного влияния на электроизоляционные свойства диэлектрика печатных плат, являются: мощность 24 Вт, диаметр пятна 2,5 мм, скорость перемещения платы 7 мм/с. Производительность пайки МАБИС с шагом выводов 0,625 составляла до 300 соедин/мин.

Исследовались температурные зависимости в зоне нагрева от частоты следования импульсов оптического излучения ( $f$ , Гц), смещения зоны нагрева от осевой линии излучателя ( $X$ , мм), диаметра пятна лазерного излучения на исследуемом объекте ( $D$ , мм), степени черноты поверхности ( $\xi$ ) [4]. Зависимости температуры нагрева от времени облучения и частоты импульсов при различных рабочих частотах ОКГ и напряжении питания ИК лампы накачки 700 В представлены на рис. 4,а, от диаметра луча – на рис. 4,б. Скорость нарастания температуры на начальном участке пропорциональна частоте импульсов излучения, однако с увеличением времени облучения до 20 с уменьшается до  $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Температура нагрева нелинейно растет с уменьшением диаметра луча в зоне пайки и с увеличением частоты импульсов, что может привести к перегреву, испарению припоя и повреждению изделий.

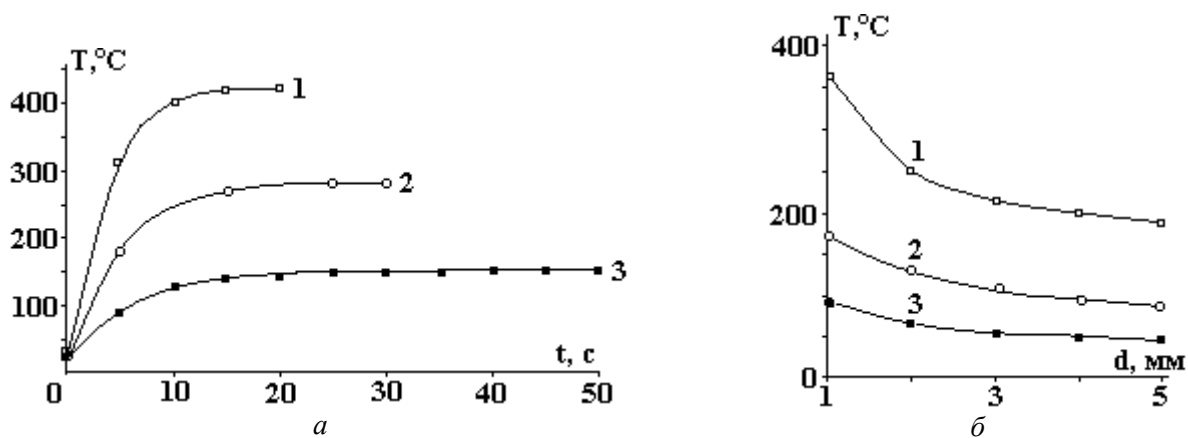


Рис. 4. Зависимости температуры нагрева зоны пайки от времени облучения (а), диаметра луча (б) и частоты импульсов  $f$ , Гц: 1 – 10; 2 – 5; 3 – 3

Анализ зависимости времени расплавления припоя от его массы и частоты следования импульсов лазерного излучения (рис. 5) показал, что необходимо выбирать диаметр луча, соизмеримый

с размерами соединений, частоту следования импульсов – 10 Гц при массе припоя 10–20 мг, поскольку при этом достигается максимальная скорость нагрева припоя, что удовлетворяет требованиям высокой производительности процесса и минимального воздействия на изделия.

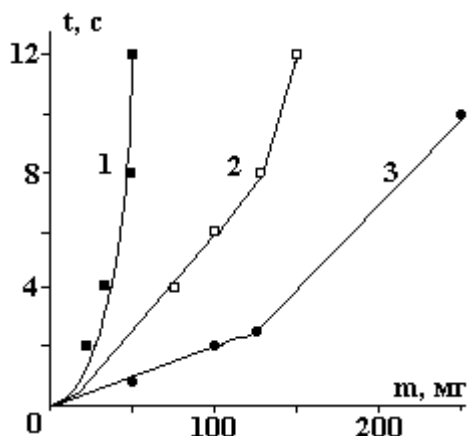


Рис. 5. Зависимости времени облучения припоя от его массы и частоты следования импульсов  $f$ , Гц: 1 – 3, 2 – 5, 3 – 10

Экспериментальные исследования процесса микросварки контактов реле из бериллиевой бронзы показали, что глубина проплавления материала линейно зависит от энергии излучения лазера при постоянных длительности импульса 4 мс и диаметре лазерного пучка 0,5 мм (рис. 6). При увеличении энергии прочность соединений сначала растет (рис. 7), что связано с увеличением глубины и диаметра зоны проплавления. Однако, когда энергия излучения больше 3 Дж, плотность мощности оказывается достаточной для выброса части расплавленного металла из сварочной ванны вследствие интенсивного испарения, поэтому площадь сечения сварной зоны, а вместе с ней и прочность уменьшаются.

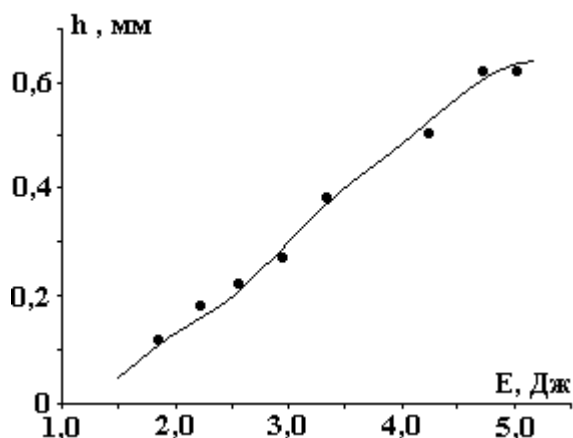


Рис. 6. Зависимость глубины проплавления от энергии излучения

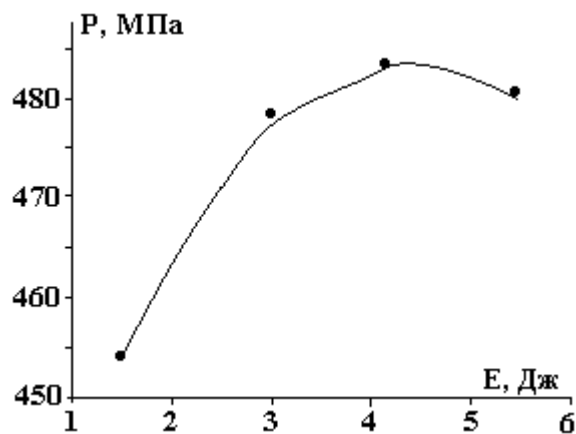


Рис. 7. Зависимость прочности сварного соединения от энергии в импульсе

Преимущества лазерного излучения, по сравнению с некогерентным инфракрасным, заключаются в высокой локализации мощности в зоне нагрева (до  $10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>); безынерционности воздействия, что позволяет вести нагрев импульсами малой длительности и точно дозировать энергию излучения; малой зоне термического влияния (0,25–2,0 мм). Оптимизация параметров импульсного лазерного излучения позволяет вести прецизионную скоростную пайку планарных выводов ИМС и многовыводных МАБИС к контактным площадкам печатных плат, безвыводных "чиповых" элементов на платы микросборок с высоким качеством, микросварку контактов микромощных реле, автоматизировать процесс, что наиболее полно отвечает требованиям современной технологии поверхностного монтажа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лазерная техника и технология / Под ред. А.Г. Григорьина. М., 1988.
2. Ланин В.Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов. 2002. № 2. С. 17–20.
3. Абакумов А.В., Ланин В.Л. Лазерная пайка интегральных микросхем на печатные платы // Радио-промышленность. 1991. № 5. С. 16–19.

### Summary

Parameters of the laser soldering and microwelding of electronics products are investigated and optimized. Optimum modes of the laser soldering are: capacity 24 Wt, diameter of a beam of 2.5 mm, speed of moving 7 mm / with, productivity up to 300 contacts/minutes. Depth of fusion at microwelding linearly depends on energy of radiation, duration of a pulse and diameter of a laser beam.

Б.Э. Эгамбердиев, Б.Ч. Холлиев, А.С. Маллаев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПРОФИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО МАРГАНЦА В КРЕМНИИ

*Ташкентский государственный технический университет,  
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Республика Узбекистан*

В полупроводниковой микроэлектронике широкое применение находят материалы, в которые вводятся примеси путем ионной имплантации, позволяющие в широком диапазоне варьировать концентрацию легирующих элементов в приповерхностных слоях.

Как известно, профили распределения примесей в кремнии, легированных элементами, создающими мелкие уровни, описываются теорией ЛШШ.

Цель настоящей работы – изучение имплантированных атомов марганца в кремнии в зависимости от дозы имплантации и температуры отжига.

Для исследований использован кремний  $p$ -типа марки КДБ-10, имплантированный марганцем с дозой  $10^{15}$ – $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. В целях активации примесей и отжига радиационных дефектов производится термоотжиг в интервале температур 300–1000<sup>0</sup>С.

Профили распределения марганца в кремнии определены методом вторично ионно-масс-спектрометрии (ВИМС), а также послойным измерением удельного сопротивления 4 зондовым методом в комбинации с удалением тонких слоев медленным травлением.

На рис. 1 показана зависимость изменения поверхностного сопротивления  $\rho_n$  – образцов с дозой имплантации  $N_0=10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> от длительности отжига при температурах 300, 515 и 600<sup>0</sup>С. Из рисунка следует, что с ростом длительности отжига сначала  $\rho_n$  повышается до некоторого максимального значения, затем снижается до параметров исходного материала независимо от температуры. При этом резкое изменение  $\rho_n$  происходит при температуре 300<sup>0</sup>С, так как за 60 мин отжига восстанавливаются параметры исходного материала. Наиболее медленное восстановление параметров исходного материала наблюдается при температуре 515<sup>0</sup>С.

Аналогичные зависимости изменения  $\rho_n$  от длительности отжига характерны для всех доз имплантации. При температурах до 600<sup>0</sup>С зависимость изменения  $\rho_n$  также не зависела от вакуума. В отличие от этого при  $T > 600^0$ С изменения  $\rho_n$  от длительности отжига становятся зависимыми от условий отжига. Такая зависимость при  $T = 800^0$ С приведена на рис. 2.

Как видно, при отжиге под давлением аргона характер изменения  $\rho_n$  аналогичен характеру изменения при  $T = 600^0$ С, тогда как  $\rho_n$  образцов, отожженных в вакууме, по мере повышения длите-