

05:06:07

## Перенос металла в Si тепловым действием непрерывного CO<sub>2</sub> лазерного излучения

© П.С. Шкумбатьюк

Дрогобычский государственный педагогический институт,  
293720 Дрогобыч, Украина

(Поступило в Редакцию 2 апреля 1998 г.)

Исследовано влияние локального теплового действия непрерывного CO<sub>2</sub> лазерного излучения с плотностью мощности до  $10^3 \text{ W/cm}^2$  на металл–Si. Выявлено, что на перенос металла в Si влияют структурные дефекты образованные в результате облучения.

Среди различных технологических направлений по внедрению примесей в Si применение теплового действия оптического излучения наиболее подробно изучено для легирования Si металлами при облучении пленки металла–Si. При этом с использованием импульсного излучения жидкофазному внедрению способствует тепловой механизм, а не твердофазное внедрение атомов металла может влиять давление лазерно-индуцированной ударной волны [1]. Вместе с тем следует ожидать, что исследование локального теплового действия непрерывного оптического излучения может дать дополнительную информацию о механизме внедрения металлов в Si.

С этой целью в данной работе приведены результаты исследования внедрения металла в Si, полученные при использовании непрерывного CO<sub>2</sub> лазерного излучения с плотностью мощности до  $10^3 \text{ W/cm}^2$ , воздействующего на металл–кремний. Для исследования использовали *p*-Si с  $\rho = 1 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$  толщиной 0.6–0.8 mm, металлы (Al, Au) на поверхность кремния наносили частицами весом до 2 mg. Облучение производили при комнатной температуре на воздухе. Плавления исходного материала указанной плотностью мощности не обнаружено.

На рис 1 показана поверхность скола по толщине после действия лазерного излучения плотностью мощностью  $8 \cdot 10^2 \text{ W/cm}^2$  на Al–Si, вес металла более 1 mg. Поверхность скола в зоне действия лазерного излучения поликристаллическая, макроскопических включений металла по толщине не обнаружено. Обнаружен выход металла на противоположную по отношению к облучению поверхность, при этом проводимость сквозного слоя облученной области при уменьшении температуры увеличивается. На глубине 0.1 mm от поверхности в зоне действия излучения (рис. 1, *a*) выявлены структурные дефекты в виде микротрещин, на глубине 0.3 mm их концентрация уменьшается (рис. 1, *b*). Последовательный анализ облучения Al–Si указал на то, что образование поликристаллической структуры с выходом металла на противоположную поверхность имеет несколько стадий: образование капли металла с окисленной поверхностью, взаимодействие металла с поверхностью в зоне действия облучения, наличие частиц Si в металле. Выход металла весом до 0.5 mg на противоположную по отношению к облучению поверхности не обнаружен независимо от па-

раметров и времени действия лазерного излучения. При облучении с противоположной стороны от поверхности металл–Si выход металла на поверхность облучения не зависит от его количества.

Анализ действия лазерного излучения на Au–Si при разных исходных условиях с Al–Si без учета времени действия излучения указывает, что проплавление металла в приповерхностную область Si отсутствует. По толщине скола зоны действия выявлены микроканалы (рис. 2) и в зависимости от количества металла в каналах образуются включения Au.

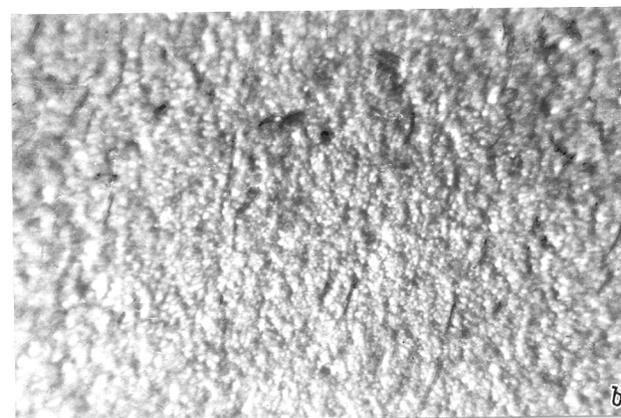
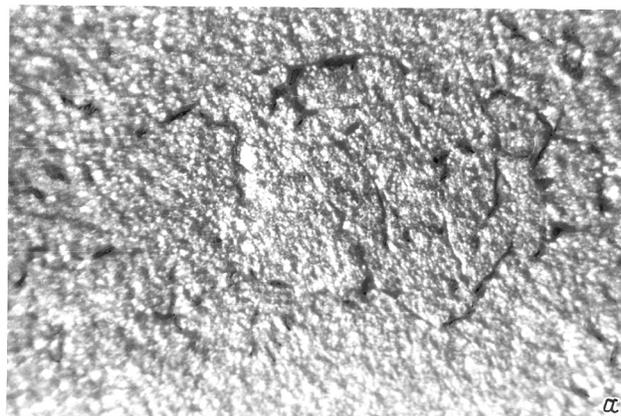


Рис. 1. Структура облученного Al–Si по толщине на глубине 0.1 (*a*) и 0.3 mm (*b*) от поверхности облучения.

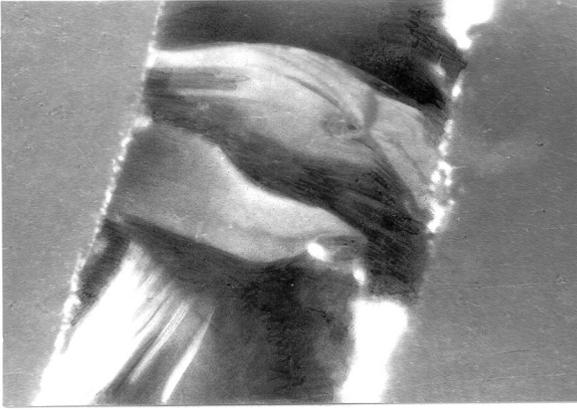


Рис. 2. Структура облученного Au-Si по толщине.

На основании этих данных проанализируем возможную модель процесса внедрения металла в Si. Плавление металла на поверхности Si может происходить при нагреве Si, когда площадь сечения лазерного луча больше частицы металла или поглощение излучения металлом в результате его окисления [2] увеличивается. Наличие частиц материала в металле указывает на их взаимодействие в поверхностной области для металлов, образующих силициды. Образование дефектов с увеличенной концентрацией в приповерхностной области металл-Si может быть обусловлено влиянием температурных напряжений с учетом дополнительного количества тепла, выделяемого в локальной области Si металлом,

$$Q(T) = c m \alpha L (T - T_0), \quad (1)$$

где  $c$ ,  $m$  — теплоемкость и масса металла,  $\alpha$  — коэффициент теплопроводности Si,  $L$  — глубина проплавления,  $T_0$  — температура вне области действия излучения.

Оценку величины температурных напряжений с учетом гауссового распределения температуры в области действия излучения  $T(r) = T \exp(-r^2/a_0^2)$  можно определить по [3]. В случае аксиальной симметрии диагональные компоненты тензора напряжений определяют из уравнений

$$\Sigma_{rr} = \frac{T \vartheta E}{1 - \nu} \frac{a^2}{r^2} \left[ \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

$$\Sigma_{\varphi\varphi} = \frac{T \vartheta E}{2(1 - \nu)} \frac{a^2}{r^2} \times \left[ 1 - \left( 1 + \exp\left(\frac{2r^2}{a^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) \right) \right], \quad (3)$$

где  $T$  — температура в зоне действия лазерного излучения,  $\vartheta$  — коэффициент линейного расширения,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $a_0$  — радиус сечения луча,  $E$  — модуль Юнга.

Для Al-Si  $T = 1200^\circ\text{C}$  (определено пирометром) и  $a_0 = 1.25 \text{ mm}$ ,  $\Sigma_{rr} = -8.17 \cdot 10^2 \text{ kg/cm}^2$ ,

$\Sigma_{\varphi\varphi} = -7.39 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$ . Согласно [4], расчетное значение  $\Sigma_{\varphi\varphi}$  больше граничной величины прочности при сжатии Si, что указывает на наличие температурных напряжений, которые приводят к образованию микротрещин в приповерхностной области. Если учитывать, что образованию микротрещин в кристаллических материалах способствует релаксация скоплений дислокаций, то вероятно, что при нагреве излучением Al-Si, согласно рис. 1,  $a$ ,  $b$ , концентрация дислокаций в приповерхностной области должна быть большой и уменьшаться по толщине. Отсюда следует, что на перенос металла преобладающим является влияние дефектов, образующихся при облучении. Для Au-Si наличие дефектов в виде микроканалов, возможно, обусловлено ограничением образования силицидов и растворимости Au. Вместе с тем вероятно, что с учетом (1) при малом количестве металла и облучении со стороны металл-Si возможность выхода металла на противоположную поверхность ограничена градиентом концентрации дефектов между приповерхностной областью и объемом.

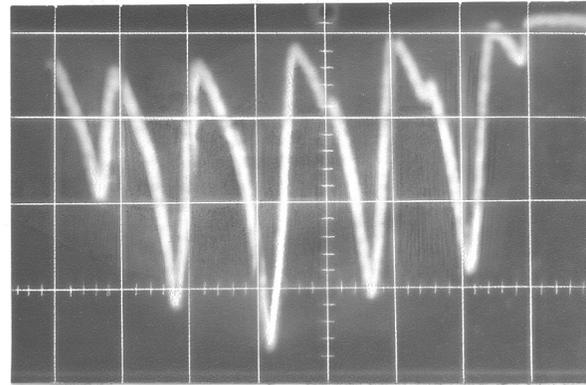


Рис. 3. Зависимость пропускания излучения с плотностью мощности  $40 \text{ W/cm}^2$  ( $x = 2 \text{ s}$  на деление) Si.

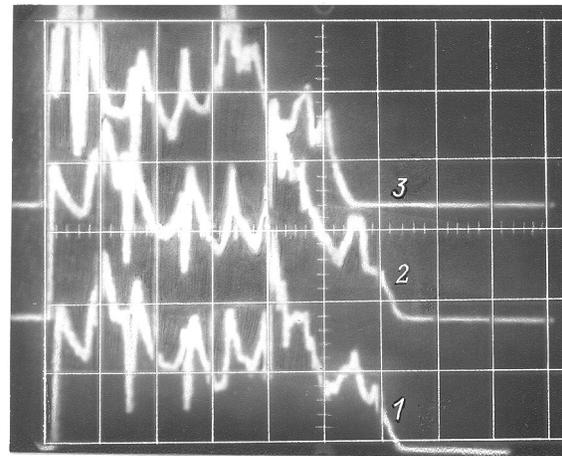


Рис. 4. Зависимость пропускания излучения с плотностью мощности  $8 \cdot 10^2 \text{ W/cm}^2$ : 1, 2 —  $T_1 = T_2$ ; 3 —  $T_3 > T_2$ ;  $T$  — температура Si до облучения ( $x = 0.2 \text{ s}$ ).

Для анализа независимости выхода металла от его количества с учетом произвольной глубины поглощения излучения от температуры Si при облучении с противоположной стороны рассматривался дополнительный механизм, связанный с возможностью влияния температурных колебаний на ускорение диффузии металла вдоль направления лазерного луча. В связи с этим исследовали пропускание лазерного излучения Si. Согласно [5], коэффициент пропускания является функцией общего числа носителей заряда

$$T = \left[ 1 + \frac{(\varepsilon_0 - 1)^2}{4\varepsilon_0} \sin^2 \phi \right]^{-1}, \quad \phi = \phi_0 + \Delta\phi(t), \quad (4)$$

$$\phi_0 = \frac{\omega\sqrt{\varepsilon_0}}{c} h \left( 1 - \frac{2\pi e^2 n_0}{\varepsilon_0 m_n \omega^2} \right),$$

$$\Delta\phi(t) = -\frac{2\pi e^2}{\omega c \sqrt{\varepsilon_0}} \left( \frac{1}{m_n} + \frac{1}{m_p} \right) P_t(T) \quad (5)$$

(где  $h$  — толщина пластины,  $m_n$  и  $m_p$  — эффективные массы электронов и дырок,  $P_t(T)$  — зависящее от времени общее число электронно-дырочных пар на единицу площади облучаемой поверхности) и имеет гармонический вид при экспоненциальной зависимости  $P_t(T)$  от времени. Исследование пропускания излучения с плотностью мощности  $40 \text{ W/cm}^2$  с учетом  $P_t(T) = \sigma_t(T)$ ,  $\sigma_t(T) = \sigma_0 \exp(-E_g/2kT)$  показало, что коэффициент пропускания согласуется с [5] (рис. 3). При облучении с плотностью мощности  $8 \cdot 10^2 \text{ W/cm}^2$  выявлен негармонический вид коэффициента пропускания (рис. 4), что указывает на не экспоненциальную зависимость  $P_t(T)$ . Предполагается, что причиной такой зависимости  $P_t(T)$  является колебание температуры в области облучения. В результате этого увеличивается возможность образования дефектов в объеме и уменьшение градиента концентрации дефектов между облученной и необлученной поверхностями с ростом в зоне облучения, что приводит к переносу металла по дефектам.

## Список литературы

- [1] Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев Н.В. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М.: Наука, 1985. 250 с.
- [2] Бонч-Бруевич А.М., Дорофеев В.Г., Либенсон М.Н. и др. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 6. С. 1733–1737.
- [3] Болли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964.
- [4] Барански П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. 1975. 704 с.
- [5] Липтуга А.И., Малютенко В.К., Бойко И.И. // ФТП. 1978. Т. 12. Вып. 7. С. 1447–1449.