УДК 621.382:621.373.820

ОЦЕНКА РАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Д. т. н. В. А. Пилипенко[1], к. ф.-м. н. В. В. Понарядов[2], д. т. н. А. С. Турцевич[3], С. В. Шведов[1], В. А. Горушко[1], к. т. н. Т. В. Петлицкая[1]

[1]Филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ», [2]Белорусский государственный университет, [3]ОАО «ИНТЕГРАЛ»
Республика Беларусь, г. Минск
office@bms.by, bsu@bsu.by, dzum@integral.minsk.by

Показано, что отклонение температуры пластины от среднего значения не зависит от времени и является одинаковым как в начале, так и в конце быстрой термической обработки световыми импульсами секундной длительности, совпадая с неравномерностью светового потока по площади пластины.

Ключевые слова: поверхность, температура, параметр, быстрая термическая обработка

При практическом использовании быстрых термообработок (БТО) в технологии создания интегральных микросхем (ИМС) важнейшее значение имеет равномерность нагрева кремниевой пластины по всей ее площади, поскольку разброс температуры, превышающий 50°C, при температуре нагрева пластины 1000°C вызывает термические напряжения в кремнии, приводящие к его пластическому течению, что, в свою очередь, оказывает влияние на параметры обрабатываемых функциональных слоев и их воспроизводимость.

Для определения разброса температуры по площади пластины, обусловленного неравномерностью облучения поверхности пластины, рассмотрим трехмерное нестационарное уравнение теплопроводности:

$$\rho c(T)\partial T/\partial t = \partial/\partial x[k(T)\partial T/\partial x] + \partial/\partial y[k(T)\partial T/\partial y] + \partial/\partial z[k(T)\partial T/\partial z], \qquad (1)$$

где ρ – плотность кремния; c – теплоемкость кремния; $T=T(x, y, z, t)$ – температура пластины в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t.

Уравнение (1) решается с начальным условием

$$T(x, y, z, t) = T_0 \quad \text{при } t=0 \qquad (2)$$

и граничными условиями

$$-(k\partial T/\partial z)_{z=0} + \sigma\varepsilon_{\text{с.ч.}}(T^4_{z=0} - T^4_0) - E_{\text{м}}(x, y, 0) = 0, \qquad (3)$$

$$\sigma\varepsilon_{\text{с.ч.}}(T^4_{z=h} - T^4_0) + (k\partial T/\partial z) = 0, \qquad (4)$$

где k – коэффициент теплопроводности кремния; σ – постоянная Стефана-Больцмана; $\varepsilon_{\text{с.ч.}}$ – степень черноты кремния; h – толщина пластины кремния; $E_{\text{м}}$ – плотность мощности светового потока, поглощенного кремниевой пластиной. Для решения уравнения (1) упростим его путем интегрирования по толщине пластины:

$$\int_0^h \rho c(T)\, \partial T/\partial t\, \partial z = \partial/\partial x\int_0^h k(T)\, \partial T/\partial x\, \partial z + \partial/\partial y\int_0^h k(T)\partial T/\partial y\, \partial z + [k\, \partial T/\partial z]_{z=h} - [k\, \partial T/\partial z]_{z=0}. \qquad (5)$$

Используя граничные условия и выражая с их помощью производные по z на поверхности пластины через плотность мощности светового потока, поглощенного кремниевой пластиной, и температуру на поверхности, уравнение (1) можно представить в виде

$$\int_0^h \rho c(T)\partial T/\partial t\, \partial z = \partial/\partial x \int_0^h k(T)\partial T/\partial x\, \partial z + \partial/\partial y \int_0^h k(T)\partial T/\partial y\, \partial z + E_{\text{м}}(x, y, 0) - \sigma\varepsilon_{\text{с.ч.}}(T^4_{z=0} + T^4_{z=h} - 2T^4_0). \quad (6)$$

Поскольку градиент температуры по толщине пластины при БТО импульсами секундной длительности практически отсутствует, то уравнение (6) запишется в виде

$$\rho c(T)\partial T/\partial t = \partial/\partial x[k(T)\partial T/\partial x] + \partial/\partial y[k(T)\partial T/\partial y] + h^{-1}E_{\text{м}}(x, y) - 2h^{-1}\sigma\varepsilon_{\text{с.ч.}}(T^4 - T^4_0), \quad (7)$$

где $E_{\text{м}} = (1 - R)E_{\text{м0}}$; $E_{\text{м0}}$ – плотность мощности фотонного потока, падающего на пластину.

Так как неравномерность облучения пластины по площади не достигает больших значений, то можно, используя уравнение теплопроводности, провести линеаризацию выражения (7). Для этого температуру пластины представим следующим образом:

$$T(x, y) \cong \bar{T} + G(x, y). \quad (8)$$

Тогда

$$c(T) \cong c(\bar{T}) + G\, \partial c/\partial T, \quad (9)$$

$$k(T) = k(\bar{T}) + G\, \partial k/\partial T, \quad (10)$$

$$T^4 \cong T^4 + 4\bar{T}^3 G. \quad (11)$$

Уравнение теплопроводности для температуры $G(x, y)$ имеет вид

$$\rho c(\bar{T})\, \partial G(x, y)/\partial t = k(\bar{T})(\partial^2 G/\partial x^2 + \partial^2 G/\partial y^2) - (8\sigma\varepsilon_{\text{с.ч.}}\, \bar{T}^3 h^{-1} + \rho\, \partial c/\partial T) \times G(x, y) + h^{-1}[E_{\text{м}}(x, y) - \bar{E}_{м}]. \quad (12)$$

Для упрощения (12) введем обозначения:

$$G_0 = G_1 \exp[\int_0^t \alpha(\bar{T})/\rho c(\bar{T}) dt], \quad (13)$$

$$\alpha(\bar{T}) = 8\sigma\varepsilon_{\text{с.ч.}}\, \bar{T}^3 h^{-1} + \rho\, \partial c/\partial T, \quad (14)$$

$$\varphi(t) = \int_0^t \alpha(\bar{T})/\rho c(\bar{T}) dt, \quad (15)$$

тогда выражение (12) примет вид

$$\rho c(\bar{T})\partial G_0/\partial \mathrm{t} = k(\bar{T})(\partial^2 G_0/\partial x^2 + \partial^2 G_0/\partial y^2) + h^{-1}[E_{\text{м}}(x, y) - \bar{E}_{м}] \exp\boldsymbol{\varphi(t)}. \quad (16)$$

Для решения (16) применим аппарат функций Грина. С этой целью введем новые переменные:

$$\tau = \int_0^t k(\bar{T})/\rho c(\bar{T})\, dt,\ \beta(\tau, x, y) = [\Delta E_{\text{м}}/k(\bar{T})]h^{-1} \exp\varphi(t). \quad (17)$$

Это позволяет записать выражение (16) в виде

$$\partial G_0/\partial\tau = (\partial^2 G_0/\partial x^2 + \partial^2 G_0/\partial y^2) + \beta(\tau, x, y). \quad (18)$$

Функция Грина выражения (18) имеет вид:

$$G(\bar{r}-\bar{r}\,',\tau) = (1/4\pi\tau)^{-1}\,\exp-\left|\bar{r}-\bar{r}\,'\right|^2/4\tau, \tag{19}$$

где $\bar{r} = (x, y)$, $\bar{r}\,' = (x', y')$.

С учетом начального условия (2), решение уравнения (16) можно записать следующим образом:

$$G(x,y,t) = 1/4\pi h\iiint \{\exp - \{[\left|\bar{r}-\bar{r}\,'\right|^2/\int_{t`}^{t}[k(t'')/\rho c(t'')]dt''] - \int_{t`}^{t}[\alpha(t'')/\rho c(t'')]dt''\}\Delta E_{м}(\bar{r}\,')\} \times$$

$$\times \{\int_{t`}^{t}[k(t'')/\rho c(t'')]dt''\rho c(\bar{T})\}^{-1}dt'dx'dy'. \tag{20}$$

Полная температура на поверхности пластины определяется выражением

$$T(x, y, t) = \bar{T}\,(t) + G(x, y, t), \tag{21}$$

где $T(t)$ – решение уравнения теплопроводности, а $G(x, y, t)$ – (20).

Уравнение теплопроводности решалось с использованием неявной численной схемы итерационным способом, а для решения (20) использовалась кусочно-постоянная аппроксимация подынтегрального выражения, и интегрирование по времени производилось с использованием регуляризации для обхода полюсов. Результаты расчета представлены на рис. 1.

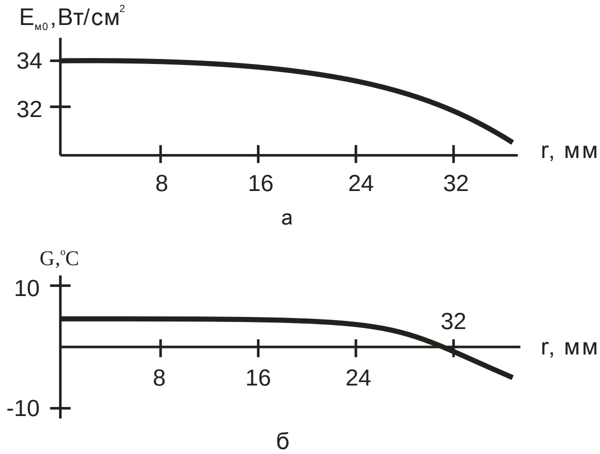

Рис. 1. Распределение плотности мощности светового потока (*а*) и отклонение температуры от ее среднего значения (*б*) по радиусу кремниевой пластины диаметром 76 мм

Таким образом, отклонение температуры от среднего значения не зависит от времени и является одинаковым как в начале, так и в конце БТО световыми импульсами секундной длительности, совпадая с неравномерностью светового потока по площади пластины. Так, при неравномерности светового потока 3%, что обеспечивается геометрическими размерами камеры, разброс температуры по площади пластины не превышает 0,01%. При наличии большой неравномерности облучения происходит перераспределение температуры по площади пластины в процессе ее нагрева.

V. A. Pilipenko, V. V. Ponaryadov, A. S. Turtsevich, S. V. Shvedov, V. A. Gorushko, T. V. Petlitskaya

Surface heating uniformity calculations of the silicon wafers in the chamber of the rapid thermal treatment unit

It has been shown, that the temperature deviation from the average value does not depend on the time parameter and is uniform both at the start and at the end of the rapid thermal treatment by means of the light pulses of a second duration, coinciding with the un-uniformity of the light flow as per the area of a wafer.

Keywords: *surface, temperature, parameter, rapid thermal annealing*