

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ НАГРЕВА КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН СВЧ ЭНЕРГИЕЙ В ОБЪЁМЕ СВЧ РЕЗОНАТОРА

Бондаренко А.С., Тихон О.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – канд.техн.наук, доцент

Аннотация. Представлен анализ особенностей нагрева кремниевых пластин СВЧ энергией. Проанализированы механизмы, ответственные за взаимодействие микроволн с веществом.

Ключевые слова. СВЧ нагрев, полупроводник, кремний.

Введение. Многие этапы обработки при производстве микро- и нанoeлектроники выполняются при повышенных температурах, например, термическое окисление, диффузия, отжиг имплантата, химическое осаждение из паровой фазы, быстрая термическая обработка [1]. Большие диаметры пластин и более жесткий контроль процесса предъявляют высокие требования к однородности и воспроизводимости процесса нагрева. Эти потребности обращают внимание на некоторые основные ограничения процесса термического нагрева, которые вызваны температурой, легированием и поглощением СВЧ излучения, зависящим от покрытия поверхности [2]. В последнее время происходит переход к более низким температурам процесса нагрева и быстрым циклам нагрева и охлаждения [3].

Основная часть. Существует множество механизмов, ответственных за взаимодействие микроволн с веществом, которые можно обобщить как диэлектрические потери, проводящие потери, магнитные потери и т.д. [4]. Составляющая электрического поля микроволн отвечает за диэлектрический нагрев. На сегодняшний день основными механизмами нагрева в микроволновом Н-поле являются потери на вихревые токи, гистерезисные потери, магнитно-резонансные потери и остаточные потери [4].

Микроволновая энергия, поглощаемая на единицу объема материала, является функцией коэффициента диэлектрических потерь ϵ'' , на который дополнительно влияет электрическое поле микроволновой энергии. В случае тонких материалов изменение энергии, поглощенной на единицу объема с коэффициентом потерь ϵ'' , является линейным и определяется уравнением [5]:

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E_{rms}^2 + 2\pi f \mu_0 \mu'' H_{rms}^2, \quad (1)$$

где f – частота; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость в воздухе; E_{rms} – среднеквадратическое значение электрического поля; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; μ'' – мнимая составляющая магнитной проницаемости, известная как коэффициент магнитных потерь; H_{rms} – среднеквадратическое значение магнитного поля.

Механизм нагрева при потерях на проводимость показан на рисунке 1 [5]. Материалы на основе некоторых чистых металлов и полупроводников имеют свободные электроны (рисунок 1а), которые начинают движение в направлении внешнего электрического поля E со скоростью v (рисунок 1б). Электропроводность этих материалов очень высока; следовательно, поле быстро затухает внутри материала, что вызывает большой ток (I_i), как показано на рисунке 1в. Следовательно, индуцированное магнитное поле (H_i) развивается в направлении, противоположном внешнему магнитному полю внутри материала. Индуцированное магнитное поле создает силу на движущихся электронах, которая толкает проводящие электроны в обратном направлении со скоростью v_r . Таким образом, кинетическая энергия передается электронам, и движение электрона ограничивается силами инерции, упругости, трения и взаимодействия молекул. Осциллирующее электрическое поле быстро повторяет это явление.

ние, что вызывает объемный и равномерный нагрев внутри материала, как схематично показано на рисунке 1г.

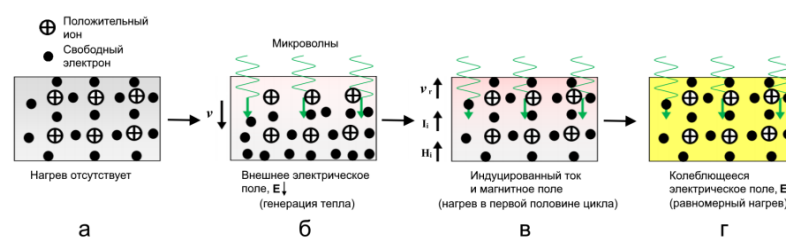


Рисунок 1 – Механизм нагрева при потерях на проводимость

Использование микроволнового излучения позволяет нагреть полупроводники до температур, превышающих 1000 °С, и получить скорость нагрева до 125 °С/сек [6].

В [7] установлено, что Si с высоким сопротивлением имеет латентный период перед быстрым нагревом. Напротив, Si с низким сопротивлением трудно нагреть до высокой температуры. Легкость нагрева из-за разницы в сопротивлении подложки показывает ту же тенденцию, что и зависимость от коэффициента потерь ϵ'' .

Закключение. В настоящее время в научно-технической литературе широко рассматриваются вопросы нагрева СВЧ энергией полупроводниковых материалов. Представленный анализ особенностей нагрева кремниевых пластин СВЧ энергией показал, что применительно к конкретному технологическому процессу необходима дополнительная база знаний о структуре материала, его размерах, свойствах, местоположении в резонаторной камере и т.д.

Список литературы

1. Vasudev, H. *Microwave heating and its applications in surface engineering: a review* / H. Vasudev [et al.] // *Materials Research Express*. – 2019. – Vol. 6, № 10.
2. Zohm, H. *Thermal processing of silicon wafers with microwave co-heating* / H. Zohm [et al.] // *Microelectronic Engineering*. – 2000. – Vol. 54, iss. 3-4. – P. 247–253.
3. Das, S.D. *Prospects of Microwave Heating in Silicon Solar Cell Fabrication – A Review* / S.D. Das // *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. – 2013. – Vol. 6, iss. 3. – P. 28–38.
4. Sun, J. *Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies* / J. Sun, W. Wang, Q. Yue // *Materials*. – 2016. – Vol. 9, № 4: 231.
5. Mishra, R.R. *Microwave-material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing* / R.R. Mishra, A.K. Sharma // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2016. – Vol. 81. – P. 78–97.
6. Thompson, K. *RF and Microwave Rapid Magnetic Induction Heating of Silicon Wafers* // K. Thompson [et al.] // *Advances in Microwave and Radio Frequency Processing: Report from the 8th International Conference on Microwave and High Frequency Heating, Bayreuth, Germany, 3–7 Sep. 2001* / Springer, Berlin; Willert-Porada M. (eds). – Heidelberg, 2006. – P. 673–680.
7. Fukushima, H. *Relation Between Complex Permittivity and Microwave Heating for Semiconductor Materials* / H. Fukushima [et al.] // *Asia-Pacific Conference on Microwave: proceedings of 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Kyoto, Japan, 6–9 Nov. 2018* / IEICE. – Tokyo, 2018. – P. 1618–1620.

UDC 533.9.07

ANALYSIS OF THE PECULIARITIES OF SILICON WAFERS HEATING WITH MICROWAVE ENERGY IN THE VOLUME OF A MICROWAVE RESONATOR

Bandarenka A.S., Tsikhan O.I.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveika S.I. – PhD of Engineering Sciences, associate professor

Annotation. In modern micro- and nanoelectronics, heating of materials is an essential part of technological processes. One of the most relevant and promising methods of heating electronic equipment materials is the use of microwave radiation. The paper presents an analysis of the peculiarities of silicon wafers heating with microwave energy. The mechanisms responsible for the interaction of microwaves with semiconductor materials were analyzed.

Keywords. Microwave heating, semiconductor, silicon.