

**«HIGH-FREQUENCY START» OF HEATING OF SILICON IN TECHNOLOGY
OF ITS PRODUCTION FROM GASEUOE DHASE**

Nikita A. Ivanov

National Research Tomsk Polytechnic University

Tomsk Polytechnic University

30, Lenin Avenue, Tomsk 634050, Russia

Abstract

The article is dedicated to investigation of the “high-frequency start” of heating of silicon in technology of its production. The dielectric properties of silicon substrate which are used on the undertaking “Usolie Sibirskii Silikon”. The scaled experiment were made on heating of silicon substrate under conditions approximating to the industrial reactor on different frequencies. The conductivity and capacity dependences of temperature on the frequencies 1KHz and 1 MHz are investigated. The efficiency of heating of silicon and dielectric loss in the rang of different frequencies are investigated.

Key words: *silicon substrate, dielectric properties, temperature dependence, dielectric loss, «high-frequency start».*

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире наблюдается рост потребления вычислительной техники (в том числе и портативной). Для производства вычислительной техники необходим кремний электронного качества с содержанием кремния свыше 99,999 % по весу, более высокими показателями по времени жизни (свыше 25 мкс). Дефицит электронного и солнечного кремния на рынке составляет 30%

Одной из распространенных технологий получения солнечного и электронного кремния является его осаждение из газовой фазы на разогретую подложку методом восстановления тетрахлорида кремния или моносилана. Нерешенной проблемой этого способа является стартовый разогрев в кремниевой подложки до температуры реакции 1050-1100 °C . Особенно проблематично нагреть подложку в области низкотемпературной примесной проводимости, где энергия активации составляет $0,1 \div 0,8$ эВ, и стартовый разогрев осложняется слабым ростом удельной проводимости кремниевой подложки $\sigma(T)$ с ростом температуры. В области собственной проводимости при температуре подложки больше 90-200°C энергия активации составляет 3÷4 эВ, и нагрев после преодоления этой температуры не представляет трудности, т.к. скорость изменения $\sigma(T)$ увеличивается на порядок. Чистота подложки должна быть не ниже чем качество осаждаемого на ней кремния, поскольку в дальнейшем она используется вместе с осажденным на нее кремнием. Чем меньше в подложке примесей, тем выше ее удельное сопротивление, что осложняет ее нагрев только за счет резистивных потерь. Для стартового разогрева подложек используют разные способы:

1. плазменный нагрев,
2. СВЧ нагрев,
3. нагрев излучением,

4. высоковольтный резистивный нагрев.

Все из выше перечисленных способов вносят примеси или усложняют конструкцию химического реактора для производства кремния [1].

Нами предложен способ стартового разогрева подложки за счет пропускания через нее высокочастотного переменного электрического тока. Разогрев кремниевой подложки при этом происходит за счет возникающих диэлектрических и резистивных потерь.

При таком способе нагрева мощность потерь, выделяемая в межэлектродном пространстве, определяется по формуле:

$$P(t, T, f) = \sigma(T, f)E_{cp}^2(T, f) + kE_{cp}^2(T, f)S^2 f \varepsilon_0 \varepsilon(T, f) \operatorname{tg} \delta(T, f)$$

σ – удельная проводимость породы, Ом·м;

E_{cp} – напряженность поля, В/м;

k – численный коэффициент;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, $8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

f – частота, Гц;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

S – расстояние между электродами прилагающими напряжение к подложке, м.

T – температура;

t – время.

Численный коэффициент k зависит от геометрических параметров подложки и определяет электрическую емкость между электродами: $C = k\varepsilon_0\varepsilon$.

Выделяемая мощность в соответствии с формулой состоит из двух слагаемых. Резистивные потери (первое слагаемое) определяются удельным сопротивлением кремниевой подложки и напряженности поля, создаваемого источником электроэнергии. Диэлектрические потери (второе слагаемое) зависят от диэлектрических свойств подложки и электрической емкости межэлектродного пространства. Для проектирования технологии и устройств нагрева, а также определения выходных параметров необходимо знать диэлектрические свойства среды и их температурные и частотные зависимости.

В связи с этим были проведены исследования диэлектрических свойств кремниевых подложек, используемых для получения солнечного кремния на предприятии Усолье-Сибирский силикон.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

При исследовании температурной зависимости удельного электрического сопротивления породы использовалось 3 образца с разных мест кремниевой подложки. Образцы 1 взяты с краев подложки, а образец 2 с центра. Измерение зависимости проводилось в диапазоне температур от 20 до 800°C. Полученные графики показаны на рис. 1.

График построен с использованием логарифмической шкалы для удельного сопротивления. По оси абсцисс отложены значения обратной температуры $1000/T$. Такие координаты выбраны для удобства расчета энергии активации кремниевой подложки, характеризующей ширину запрещенной зоны полупроводника.

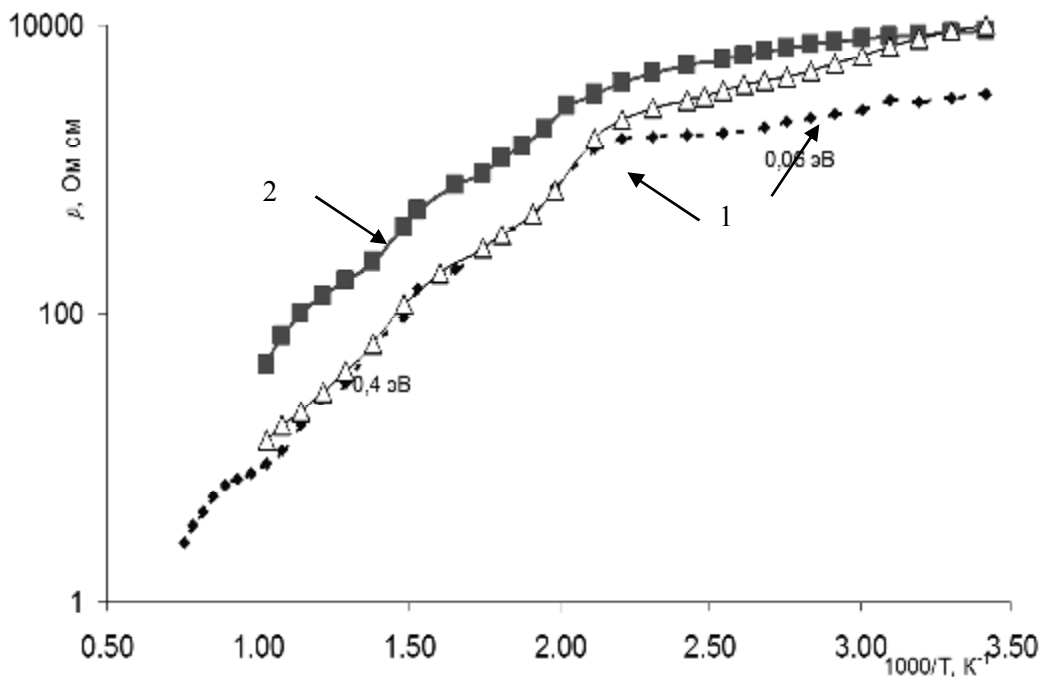


Рис.1. Температурная зависимость удельного сопротивления

В областях температур, где концентрации носителей заряда равновесны, зависимость должна быть линейной. Тангенс угла наклона характеристики в таком случае характеризует энергию активации носителей заряда:

$$\Delta W = 2k \frac{\Delta(\ln \rho)}{\Delta(1/T)},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

В области температур 20-200°C зависимость близка к линейной и характеризует энергию активации носителей заряда, обусловленных наличием примесей. Энергия активации в этой зоне составляет 0,06эВ.

В области температур выше 200°C также возникает линейная зависимость, свидетельствующая о том, что материал переходит в зону собственной проводимости. Энергия активации в этой области, рассчитанная по углу наклона характеристики, составляет 0,4 эВ.

Поликристаллическая кремниевая подложка представляет собой слоистый материал, следовательно, обладает анизотропией свойств. То есть физические и химические свойства, определяемые молекулярной структурой вещества, будут различаться в зависимости от

ориентации слоев осажденного кремния. В частности удельное сопротивление будет отличаться в зависимости от направления.

На рис. 2 показаны характеристики $\rho(T)$ поперек слоев. На рис. 3. вдоль слоев. Для исследования температурных зависимостей использовались измерительные мосты E7-8, измеряющий диэлектрические параметры на частоте 1кГц, и E7-12[3], измеряющий диэлектрические параметры на частоте 1МГц. Измерения проводились на установке, имеющей вакуумируемую нагревательную камеру с теплоизоляцией, снабженной несколькими встроенными термопарами для измерения температуры.

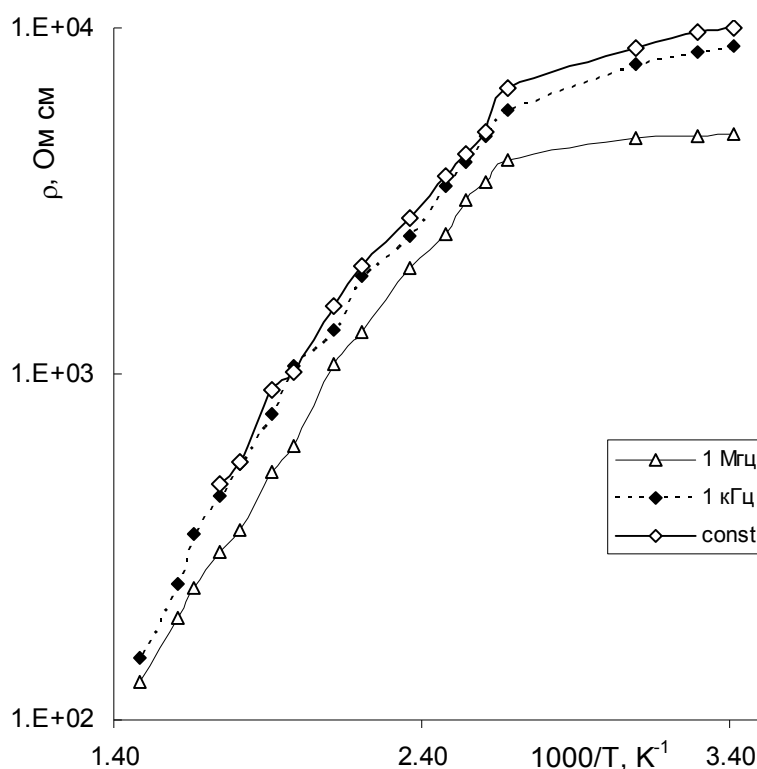


Рис.2. Температурная зависимость удельного сопротивления на разных частотах поперек слоев

Величина мощности диэлектрических потерь зависит также от значения емкости межэлектродного пространства. Эта емкость определяется геометрической конфигурацией электродной системы и величиной относительной диэлектрической проницаемости среды, которая также будет зависеть от температуры и частоты. Таким образом, необходимо знать температурную зависимость диэлектрической проницаемости. На рис.4 показана усредненная зависимость емкости образца от температуры. Рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость в чистом виде не удалось из-за наличия систематической ошибки, обусловленной наличием значительных паразитных емкостей. Однако полученные кривые позволяют сделать вывод о поведении диэлектрической проницаемости в температурном диапазоне.

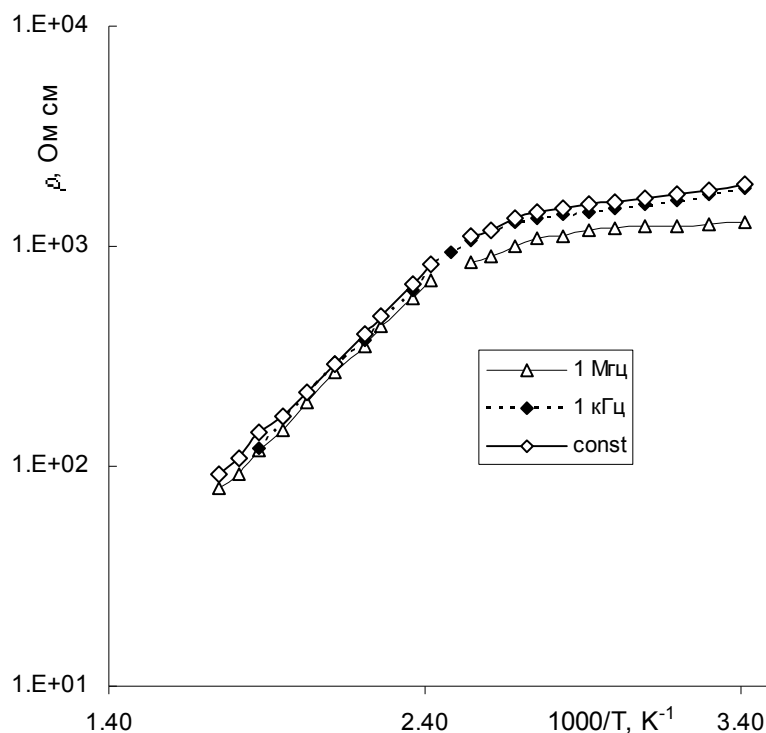


Рис.3. Температурная зависимость удельного сопротивления на разных частотах вдоль слоев

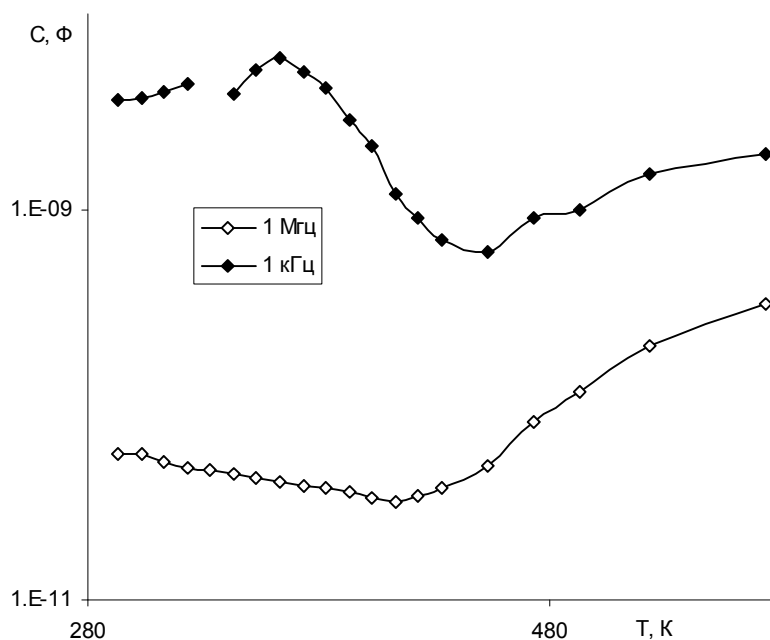


Рис.4. Температурная зависимость емкости образца

Видно, что значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь значительно меняются в температурном диапазоне. Таким образом, при расчете динамики процесса нагрева породы переменным электрическим током необходимо учитывать изменение свойств от температуры.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МАСШТАБИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК В УСЛОВИЯХ ПРИБЛИЖЕННЫХ К ПРОМЫШЛЕННОМУ РЕАКТОРУ

Для нагрева подложек была использована вакуумированная камера с токовводами. Для определения мощности вводимой в стержень переменным током на разных частотах, осциллографировались ток и напряжение. Температура фиксировалась с помощью хромель-копелевой термопары. Электроды изготавливались из графитовой ваты, прижатой медными хомутами рис. 5, для предотвращения окисления нагрев производился в атмосфере аргона при атмосферном давлении (рис. 6).

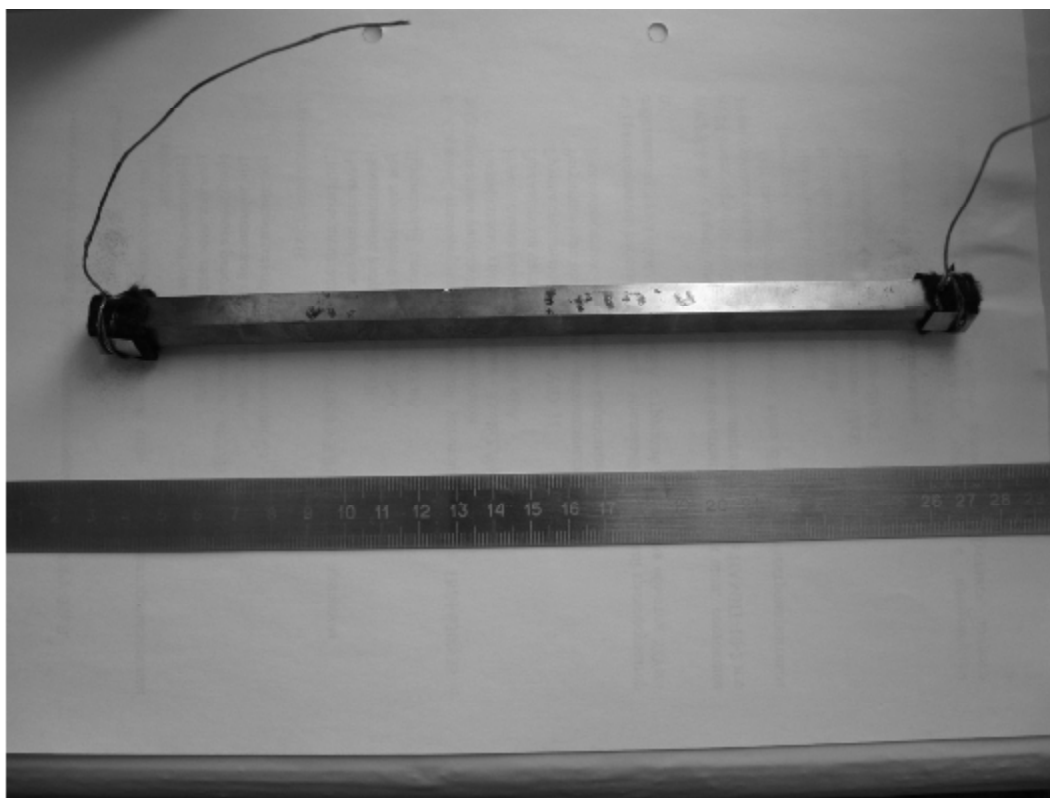


Рис. 5. Стержень с электродами из графитовой ваты и пластин меди.

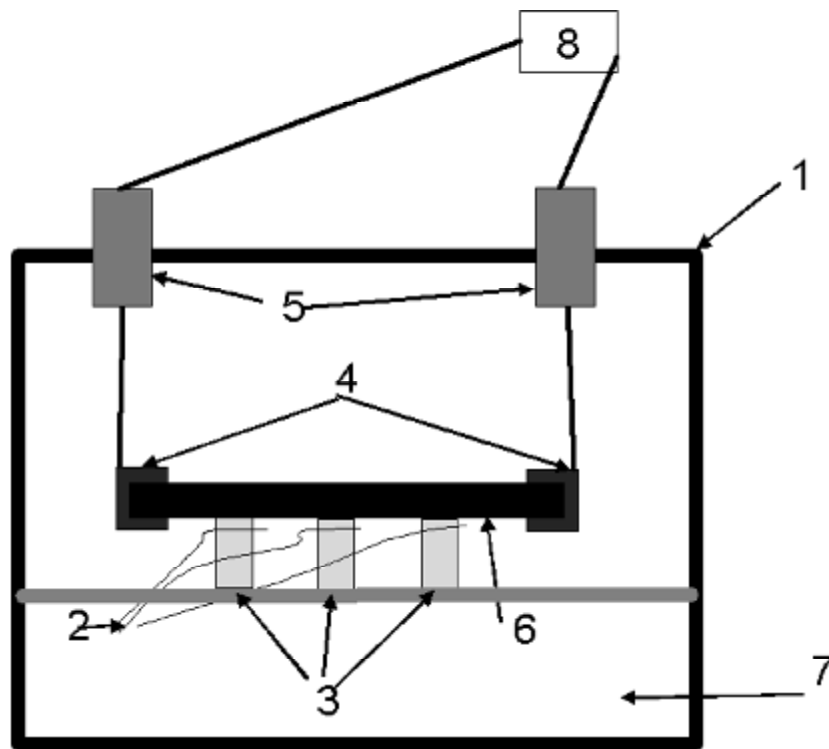


Рис. 6. Камера для нагрева стержней, 1 – камера, 2 – термопары, 3 – подставки (нитрид бора), 4 – графитовые электроды, 5 – токовводы, 6 – кремниевая подложка 10x10x240 мм, 7 – аргон при атмосферном давлении, 8 – генератор

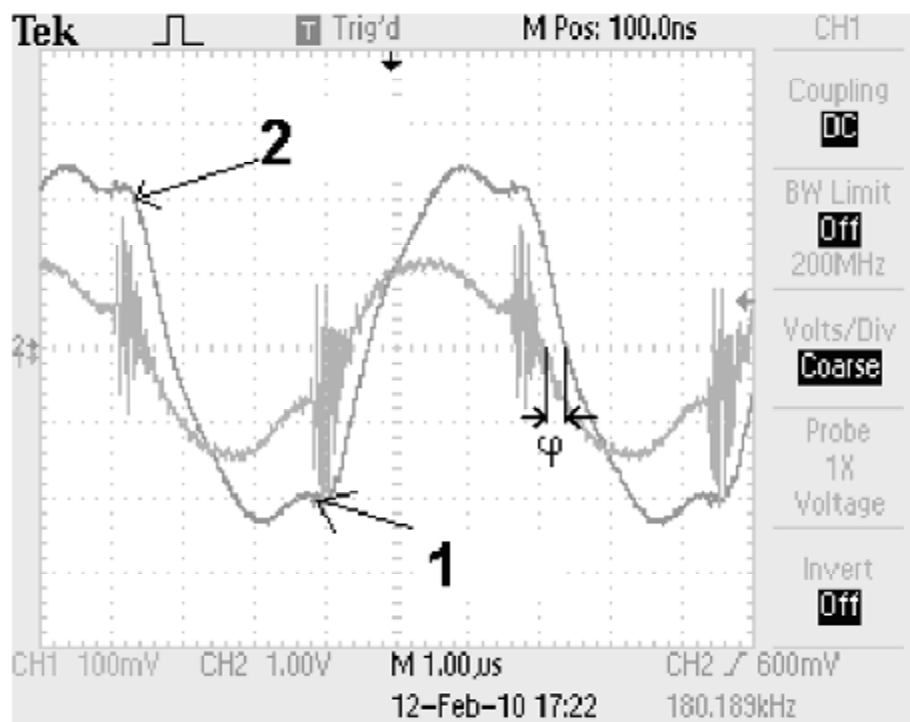


Рис.7. 1- форма напряжения с коэффициентом деления 100, 2-форма тока в 1A=1В. φ –угол смещения тока относительно напряжения

Для определения мощности, вводимой за счет резистивных и диэлектрических потерь, подложка нагревалась на постоянном напряжении, по величине равному действующему напряжению при нагреве переменным током на частотах: 70кГц, 100кГц, 150кГц, 180кГц.

По смещению сигнала тока относительно напряжения и разнице вводимой мощности на переменном и постоянном напряжении (рис. 7) можно определить тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ и емкость подложки. Расчет емкости проводился для параллельной схемы диэлектрика.

Мощность, вводимая в подложку, определялась интегрированием мгновенной мощности за период:

$$P_{\text{полн}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt, \quad (1)$$

где $P_{\text{полн}}$ – мощность, вводимая в образец, t – время, T – период сигнала, u – напряжение, i – ток.

Разница мощности, вводимой на частоте и на постоянном напряжении, равняется диэлектрическим потерям:

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{рез}} + P_{\text{диэл}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{рез}} = U \cdot I; P_{\text{диэл}} = U^2 \cdot C \cdot \omega \cdot \tan \delta, \quad (3)$$

где $P_{\text{рез}}$ – мощность резистивных потерь в подложке, $P_{\text{диэл}}$ – мощность диэлектрических потерь в подложке, U – приложенное напряжение, I – ток, C – емкость, ω – частота, $\tan \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

$$C = \frac{P_{\text{полн}} - P_{\text{рез}}}{U^2 \cdot \omega \cdot \tan \delta}; \delta = 90^\circ - \varphi, \quad (4)$$

где φ – угол смещения тока относительно напряжения (рис. 7).

Из (8),(9) вычисляем емкость от температуры на разных частотах [2].

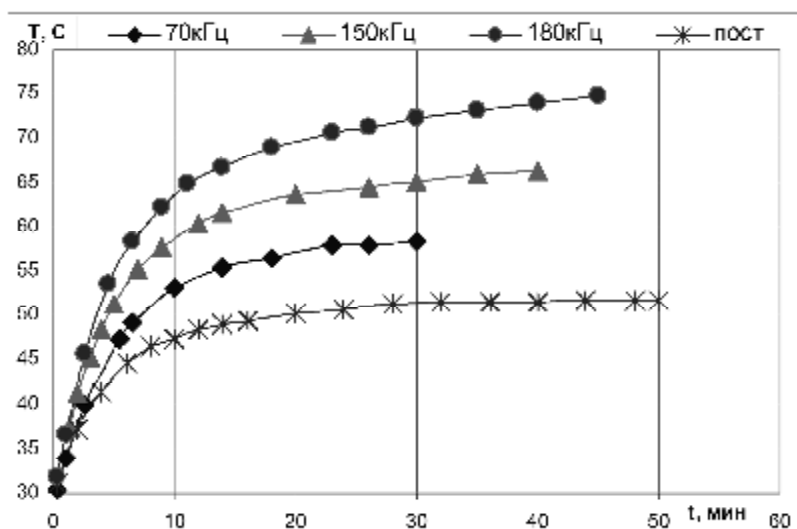


Рис. 8. Температура подложки от времени. Нагрев проводился при $U_{\text{эфф}}=164$ В

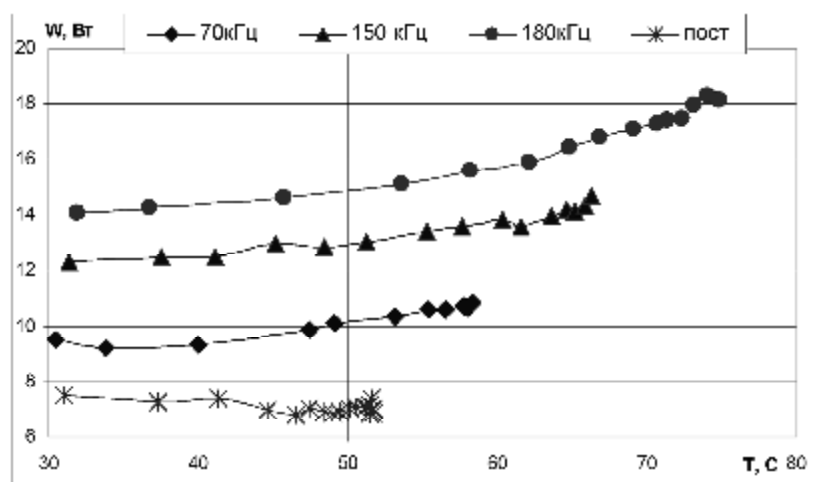


Рис. 9. Мощность, выделяемая в подложке от температуры. Нагрев проводился при $U_{эфф}=164$ В

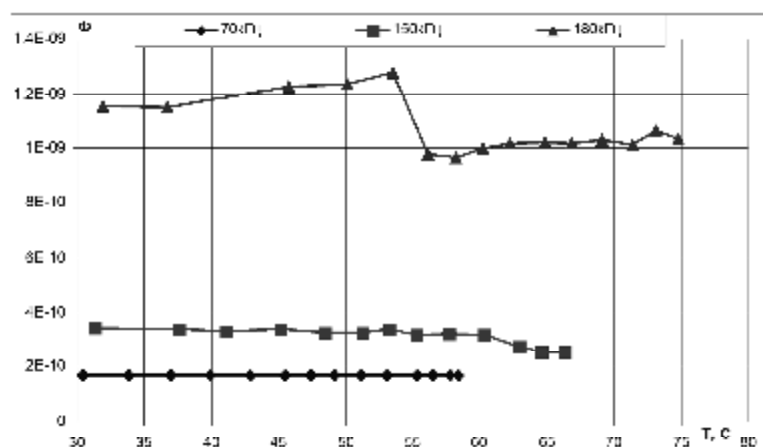


Рис. 6. Емкость подложки от температуры

Анализируя результаты диэлектрического нагрева кремниевой подложки на различных частотах и расчета диэлектрических потерь, можно сделать следующие выводы:

- мощность, вводимая в подложку за счет диэлектрических потерь, сравнима с мощностью резистивных потерь (рис. 5);
- нагрев на переменном напряжении до двух раз эффективнее, чем нагрев на постоянном напряжении (рис.4);
- диэлектрические потери растут с увеличением частоты и температурой;

Таким образом, применение диэлектрического стартового разогрева кремниевой подложки позволяет в два раза снизить время нагрева до температуры синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Салли И.В., Фалькевич Э.С. Производство полупроводникового кремния. Металлургия, 1970 г.
2. Казарновский Д.М., Тареев Б.М., Испытания электроизоляционных материалов. Госэнергоиздат, 1977 г.
3. Е7-8. Измеритель L, C, R цифровой. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 2.724.007 ТО, МНИПИ, Минск, 1987г.