

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. N. Magunov, E. V. Mudrov, Measurement of monocrystal temperature in the 300–700 K range on the basis of infrared radiation absorption,  
*TVT*, 1991, Volume 29, Issue 1, 182–184

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt4183>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.174

May 13, 2025, 13:26:38



болоидов с отношением радиусов в критической точке  $k=0,25$  и 4 осесимметричное решение одно и то же, в то время как реальные значения  $q$  на этих телах отличаются: при  $x=0$  — в 2 раза, при  $x=3R$  — в 3 раза. Поэтому использование обычных осесимметричных решений, в отличие от предложенных в данной работе, может приводить к большим ошибкам.

На рис. 3 приведены результаты расчета  $q$  к поверхности трехосного эллипсоида с соотношением между осями  $1:2,5:0,5$  при  $\alpha=15^\circ$  для некаталитической (линии *a*) и идеально каталитической (линии *b*) поверхностей. Линии 1 и 2 соответствуют  $h=70$  и 80 км. Распределение  $q$  вдоль поверхности двухполостного гиперboloида с углом полураствора в плоскости симметрии  $40^\circ$  и  $k=0,4$  для различных точек траектории приведены на рис. 4. Линии 1–3 соответствуют  $h=100, 80$  и 70 км,  $\alpha=30^\circ$  (модель 2).

Расчет тепловых потоков с помощью соотношения (1) хорошо согласуется с точным решением независимо от каталитических свойств поверхности во всем рассмотренном диапазоне высот. Область применимости более простого соотношения (3), не требующего использования при расчетах переменных чисел  $Re_\infty^*$ , зависит от каталитических свойств поверхности. С помощью (3) можно определять тепловые потоки с хорошей точностью для некаталитической поверхности при  $h \lesssim 65$  км, для идеально каталитической — при  $h \lesssim 90$  км, для других моделей — при  $h \lesssim 75$  км.

Использование соотношений подобия (1)–(4) дает возможность применять программы расчета осесимметричных течений для решения пространственных задач.

Авторы выражают благодарность Г. А. Тирскому за внимание к работе.

### Литература

1. Cooke J. C. // Aeronaut. Res. Council. 1959. N 3200. 12 p.
2. Брыкина И. Г., Русаков В. В. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1989. № 6. С. 117.
3. Scott C. D. // AIAA Paper. 1980. N 1477. 9 p.
4. Щербак В. Г. // ПМТФ. 1989. № 1. С. 49.
5. Masek R. V., Hender D., Forney J. A. // AIAA Paper. 1973. N 737. 14 p.

Институт механики  
МГУ им. М. В. Ломоносова

Поступило в редакцию  
22.01.90

УДК 535.341+536.55+621.315.592 1991 г.

*А. Н. Магунов, Е. В. Мудров*

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 300–700 К ПО ПОГЛОЩЕНИЮ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

Процессы осаждения тонких пленок на полупроводниковую подложку, а также травления пленок, протекающие в низкотемпературной плазме газового разряда, чувствительны к температуре подложки [1]. Для достижения воспроизводимости температуры необходим прежде всего чувствительный метод контроля. Измерение температуры с помощью термопар не всегда возможно в реакторе из-за высокого уровня электромагнитных помех, связанных с наличием газоразрядной плазмы. Метод радиационной пирометрии [2] трудно применять из-за относительно сильного неравновесного свечения плазмы, превосходящего по интенсивности слабое температурное излучение полупроводниковой пластины. Практически для диапазона температур пластины в реакторе  $T \approx 700$  К невозможно использовать бесконтактные методы в случае диагностики по собственному излучению.

Однако возможно измерение температуры, основанное на использовании температурной зависимости края собственного поглощения [3] для монокристаллического кремния. Облучая полупроводник светом с длиной волны, принадлежащей области края собственного поглощения, можно регистрировать результат температурного сдвига края — изменение прозрачности пластины по сравнению с прозрачностью при комнатной температуре. В качестве источника света удобно использовать лазер, так как при этом не требуется оптическая система, а спектральная интенсивность лазерного излучения существенно превышает фоновое излучение газоразрядной плазмы. Мощность лазера выбирается таким образом, чтобы во всем диапазоне температур поглощение излучения не приводило к заметному нагреву пластины.

В экспериментах использовался промышленный кремний марок КЭФ-4,5 с концентрацией легирующей примеси (фосфора)  $\approx 10^{15}$  см $^{-3}$ , удельным электрическим сопротивлением  $\approx 4,5$  Ом·см, концентрацией свободных электронов  $\approx 10^{15}$  см $^{-3}$  при  $T=300$  К, а также КДБ-10 с концентрацией примеси (бора)  $\approx 10^{15}$  см $^{-3}$ , удельным сопротивлением  $\approx 10$  Ом·см, концентрацией свободных дырок  $\approx 10^{15}$  см $^{-3}$  при  $T=300$  К. Образцы имели форму полированных пластин диаметром 76 мм и толщиной  $\approx 350$  мкм.

Экспериментально получена зависимость светопропускания пластины кремния от температуры. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Образец (кремний КЭФ-4, 5 или КДБ-10) приклеивался силикатным клеем между двумя мас-

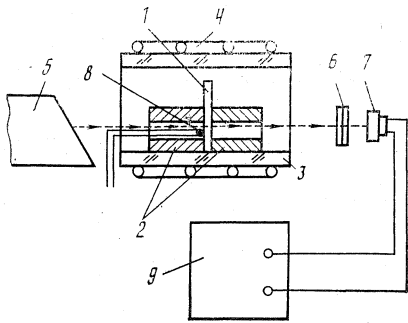


Рис. 1

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — образец, 2 — металлический блок, 3 — кварцевая труба, 4 — нагреватель, 5 — лазер, 6 — фильтр, 7 — фотоприемник, 8 — термопара, 9 — вольтметр

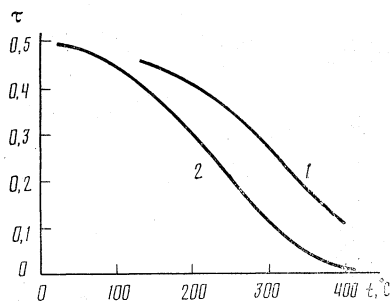


Рис. 2

Рис. 2. Температурные зависимости светопропускания: 1 — [5], 2 — данная работа

сивными металлическими блоками с отверстиями для пропускания светового пучка. Держатель, состоящий из двух блоков, помещался в кварцевую трубу длиной 40 см и внутренним диаметром 10 см. Нагреватель — нихромовая спираль, навитая на трубу; напряжение питания подавалось с регулируемого автотрансформатора. В отверстие держателя вводилась медь-константановая термопара, откалиброванная по ртутному термометру в диапазоне 30–200°С. В области 200–400°С использовались табличные значения [4]. Источник излучения — гелий-неоновый лазер ЛГ-126. После прохождения сквозь образец и интерференционный светофильтр излучение  $\lambda = 1,15$  мкм регистрировалось кремниевым фотодиодом в фотовольтаическом режиме. Термопара касалась кремниевой пластины на расстоянии  $\approx 2$  мм от центра светового пятна.

Измерение светопропускания проводилось при постепенном понижении напряжения питания от максимального значения. Спустя 60 мин после установки максимального напряжения измерялись термоЭДС и фотоЭДС, затем устанавливалось меньшее значение напряжения, после 30-минутной выдержки снимались следующие показания и т. д. до комнатной температуры (со временем выдержки в каждой точке 30 мин). Время задержки между установлением напряжения питания и регистрацией термо- и фотоЭДС соответствует времени прихода системы в состояние с минимальными градиентами температур и постоянными температурами в любой фиксированной точке образца.

Для установления возможного разброса значений температуры термопара устанавливалась в разных точках пластины. Максимальный градиент температуры, связанный с несимметричным расположением держателя в трубе, возникает при  $t \approx 400^\circ\text{C}$  и составляет  $\sim 10^\circ\text{C}/\text{см}$ . При меньших температурах пластины градиент уменьшается. Можно считать, что отличие температур в точке контакта термопары и в центре лазерного пятна не превышает 2–3°С.

На рис. 2 сравнивается светопропускание по нашим данным и [5]. Расхождение с результатами [5] составляет  $\sim 90^\circ\text{C}$  и связано, по-видимому, с тем, что в [5] термопарой измерялась температура графитового держателя, а не кремниевой пластины. Кроме этого, точка измерения термоЭДС удалена от области оптического зондирования. Поскольку в [5] цикл нагрев — остывание длится несколько минут, то в системе не достигается минимум градиента температуры, так как теплообмен осуществляется в небольшом числе локальных контактов, а излучательный перенос затруднен вследствие малой поглощательной способности кремния в диапазоне  $\lambda = 2,5$ –20 мкм (рис. 3). Край собственного поглощения имеет высокий коэффициент поглощения (рис. 4), но интенсивность излучения графита в этой области спектра мала [6]. Отсутствие учета влияния градиента температуры и времени выхода на режим в системе графит — кремний может приводить к значительному занижению коэффициентов поглощения при ускоренных измерениях в удаленных друг от друга областях системы.

Аналогично работе [5] проведен контроль постоянства оптических свойств пластины до нагрева и после нескольких циклов нагрева до  $t = 400^\circ\text{C}$  общей длительностью порядка 10 ч. Для этого регистрировался спектр пропускания в диапазоне  $\lambda = 2,5$ –20 мкм на спектрофотометре Specord IR-75. Никаких заметных отличий в спектрах, полученных до и после нагрева, не обнаружено. С помощью же спектрофотометра оценивалась величина рассеянного полированными поверхностями света. В диапазоне  $\lambda = 0,22$ –0,83 мкм доля рассеянного света монотонно уменьшается с увеличением длины волны и уже при  $\lambda = 0,34$  мкм не превышает 0,5% от интенсивности всего отраженного света, что позволяет считать шероховатость полированных поверхностей несущественной для измерений пропускания света на длине волны 1,15 мкм.

В случае идеально плоскопараллельной пластины использование лазерного излучения приводит к необходимости учитывать интерференцию. Применяемые пластины, согласно измерениям [6], имеют среднюю клиновидность  $dh/dx \approx (1-3) \cdot 10^{-4}$ , где

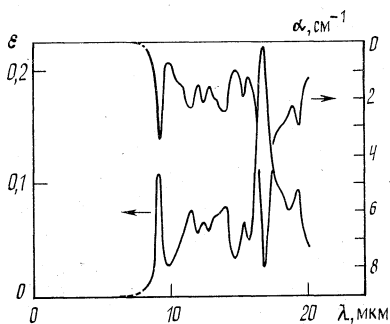


Рис. 3

Рис. 3. Спектр поглощения  $\alpha(\lambda)$  и поглощательная способность кремниевой пластины  $\xi(\lambda)$

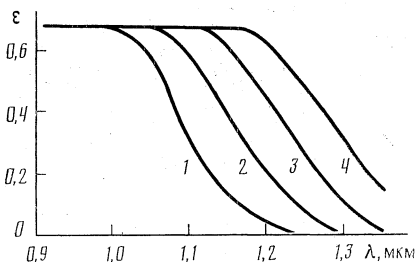


Рис. 4

Рис. 4. Поглощательная способность в области края поглощения: 1 -  $T=373$  К, 2 - 473, 3 - 573, 4 - 673

$h$  - толщина пластины,  $x$  - координата вдоль диаметра пластины. Если число максимумов интерференции в сечении светового пучка больше единицы, интерференция слабо заметна. Необходимый диаметр пучка  $d$  при коэффициенте преломления пластины  $n$  можно оценить из соотношения

$$\frac{2dn}{\lambda} \frac{dh}{dx} > 1. \quad (1)$$

Отсюда диаметр светового пучка должен быть больше чем 800 мкм. При измерениях использовался лазерный пучок диаметром  $\approx 3$  мм, интерференционные явления при изменении температуры пластины не наблюдались. Таким образом, использование отклонений от геометрической идеальности пластин позволяет избежать учета теплового расширения и температурной зависимости показателя преломления, так как при усреднении по сечению пучка интерференция не проявляется и расчет коэффициента поглощения проводится в приближении многократных отражений в пластине. Поскольку при многократных отражениях в пластине, имеющей клиновидность, прошедшие лучи расходятся «веем», приемник излучения перемещается возможно ближе к образцу. Опыты проводились при попадании на чувствительную область приемника не менее четырех прошедших лучей наибольшей интенсивности. Не регистрируемые приемником прошедшие лучи более высоких порядков составляют  $< 0,01\%$  интенсивности прошедшего излучения и при расчетах в приближении многократных отражений не учитывались.

Статистическая обработка экспериментальных точек в двойных логарифмических координатах методом наименьших квадратов дала зависимость коэффициента поглощения кремния КЭФ-4,5 и КДБ-10 на длине волны 1,15 мкм вида ( $T$  - в К)

$$\alpha (\text{см}^{-1}) \approx 6,71 \cdot 10^{-19} T^{7,15}. \quad (2)$$

Погрешность использования данной аппроксимации при измерениях температуры составляет  $< 5\%$  от измеряемой температуры при  $T=410-660$  К. Чувствительность в указанном температурном интервале  $\approx 4\%$  пропускания при изменении температуры на 2 К. Заметных различий в результатах при измерениях зависимостей коэффициента поглощения от температуры для КЭФ-4,5 и КДБ-10 не обнаружено.

### Литература

1. Плазменная технология в производстве СБИС/Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. М.: Мир, 1987.
2. Свет Д. Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. М.: Наука, 1968.
3. Черепанов Т. Я. // Измерения, контроль, автоматизация. 1988. Вып. 2. С. 31.
4. Таблицы физических величин. Спр./Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
5. Биленко Д. И., Белоброва О. Я., Дворкин Б. А., Ципоруха В. Д. // Опт. и спектр. 1982. Т. 53. Вып. 3. С. 469.
6. Магунов А. Н., Мудров Е. В. // Бесконтактное измерение температуры кремниевой пластины в диапазоне 300-700 К. Препринт. Ярославль: Ин-т микроэлектроники АН СССР, 1989. № 10.

Институт микроэлектроники АН СССР  
г. Ярославль

Поступило в редакцию  
28.09.89