

Учреждение Российской академии наук  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. Лебедева РАН

На правах рукописи  
УДК 536.241 548.4

Аминев Денис Фагимович

**Гетероструктуры поликристаллический алмаз/кремний: тепловые свойства структуры  
и модификация кремния при осаждении алмаза**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Отделении физики твердого тела Учреждения Российской академии наук  
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

|                        |                                                                                                  |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Научный руководитель   | доктор физико-математических наук<br>Галкина Татьяна Ильинична                                   |
| Научный консультант    | кандидат физико-математических наук<br>Клоков Андрей Юрьевич                                     |
| Официальные оппоненты: | доктор физико-математических наук<br>Маненков Александр Алексеевич,<br>Институт общей физики РАН |

кандидат физико-математических наук  
Инюшкин Александр Васильевич,  
Российский научный центр  
«Курчатовский институт»

|                     |                                                                                          |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ведущая организация | Физический факультет Московского<br>Государственного Университета<br>им. М.В. Ломоносова |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|

Защита состоится \_\_\_\_ декабря 2010 года в \_\_\_\_ часов на заседании ученого совета Д  
002.023.03 при Учреждении Российской академии наук Физическом институте им. П.Н. Лебе-  
дева РАН по адресу: г. Москва, Ленинский пр., д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии на-  
ук Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, с авторефератом – на сайте института  
[www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Отзывы на автореферат просим присылать по адресу:

119991 г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН, отделение физики твердого тела.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 002.023.03 д.ф.-м.н., проф.

Шиканов А.С

## **Общая характеристика работы.**

### **Актуальность работы.**

В настоящее время достигнут значительный прогресс в развитии плазмохимического роста алмазов (chemical vapor deposition – CVD). Скорость роста пленки поликристаллического алмаза достигает десяти микрон в час [1], что обещает в скором времени достижение экономически рентабельных скоростей в десятки/сотни микрон в час. Таким образом, представляется возможным широкое использование алмаза по типу технологии «кремний на изоляторе» – КНИ (SOI) [2]. Обычно в качестве изолятора в устройствах, изготавливаемых по этой технологии используется  $\text{SiO}_2$ , который обладает существенным недостатком – низкой теплопроводностью. Как известно, теплопроводность ориентированных алмазных пленок близка к теплопроводности алмаза типа IIa – 2200 Вт/м·К [3]. Таким образом, использование алмаза позволит изготавливать значительно более мощные и высокочастотные устройства по сравнению с обычной кремниевой микроэлектроникой, а также может оптимизировать стабильность работы уже существующих за счет улучшения теплоотвода.

Возможным препятствием для хорошего теплоотвода могут являться тепловые свойства тонкого промежуточного слоя между алмазной пленкой и кремниевой подложкой. Кроме того, напряжения, возникающие в кремниевой подложке при остывании после осаждения алмаза, могут привести к деградации микроэлектронных устройств. Таким образом, возможной проблемой при реализации данной концепции (кремний на алмазе – КНА) может являться градиентное тепловое сопротивление алмазная пленка/кремниевая подложка, теплопроводность самой алмазной пленки, а также структурные и электронные свойства подложек кремния.

Следовательно, исследование тепловых свойств структуры CVD-алмаз/кремний, а также модификации кремниевой подложки после осаждения поликристаллических алмазных слоев является весьма актуальным.

**Цель исследования:** определить влияние условий плазмохимического процесса и способа подготовки поверхности кремниевой подложки на теплопроводность алмазной пленки и граничное тепловое сопротивление CVD-алмаз/кремний, а также на наличие напряжений в кремниевой подложке.

Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

1. Экспериментальное определение тепловых параметров многослойной структуры CVD-алмаз/кремний в зависимости от технологических параметров CVD-процесса и от способа предварительной подготовки поверхности кремниевой подложки.
2. Исследование возможной модификации кремниевой подложки с помощью измерения фотолюминесценции.

**Научная новизна.**

- Исследовано распространение тепла в гетероструктуре, состоящей из поликристаллической алмазной пленки, осажденной из углеводородной плазмы на ориентированную (100) кремниевую подложку. Для этого разработана методика измерения кинетики остывания тонкопленочного индиевого термометра, нанесенного на алмазную пленку, после нагрева наносекундными импульсами азотного лазера. В рамках теории теплопроводности построена математическая модель релаксации тепла в полученной слоистой структуре с учетом межслоевых тепловых сопротивлений. Экспериментальные отклики сравнены с рассчитанными. Проведенный анализ позволил определить одновременно коэффициент теплопроводности алмазной пленки в направлении перпендикулярном росту и граничное тепловое сопротивление интересующего нас интерфейса алмаз/Si.

- Найдено, что качество финишной обработки поверхности подложки Si практически не влияет на граничное тепловое сопротивление гетерограницы CVD–алмаз/Si при комнатных температурах (в пределах точности нашего эксперимента  $3 \cdot 10^{-9}$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт, что превосходит точность похожих экспериментов, приводимых в литературе –  $4 \cdot 10^{-9}$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт).
- Впервые определено значение граничного теплового сопротивления CVD-алмаз/кремний, которое составляет  $3.9 \cdot 10^{-8}$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт, при температуре 80 K, что почти на порядок выше, чем при T=298K.
- Проведен анализ спектров низкотемпературной фотолюминесценции подложек кремния, подвергнутых различной финишной обработке (механической полировке и химико-механической полировке приборного качества) после осаждения алмазной пленки.
- Показано, что в случае финишной обработки поверхности кремния приборного качества (device-grade) (предположительно в связи с более сильной адгезией), в кремниевой подложке возникают напряжения, релаксирующие в виде дислокаций. Обнаружено, что в этом случае возникают линии дислокационного излучения, соответствующие плотности дислокаций  $\sim 10^4$  см<sup>-2</sup>.

### **Практическая значимость.**

- В работе впервые предложен и применён метод измерения тепловых свойств гетероструктуры полиалмаз/кремний. Сравнение экспериментальных данных кинетики остывания индиевого термометра с расчетными данными позволило одновременно определить значение коэффициента теплопроводности поликристаллической алмазной пленки и граничное тепловое сопротивление CVD–алмаз/кремний. Полученные значения тепловых параметров показывают, что CVD-алмазная пленка несмотря на отсутствие

ярко выраженной текстуры может быть эффективным теплоотводом при комнатной температуре.

- В работе обнаружен новый эффект – показано, что осаждение поликристаллических алмазных пленок в СВЧ плазме на подложки кремния может приводить в определенных условиях к появлению дислокаций в кремнии вследствие, предположительно, напряжений термического характера в системе пленка-подложка, определяемых хорошей адгезией алмазных пленок. Более тщательное исследование условий возникновения дислокаций в кремнии необходимо для дальнейшего развития мощных кремниевых устройств с алмазным теплоотводом. Можно предположить, что после изготовления структур алмаз/кремний с толщиной подложки кремния ~ 3 мм и с последующей сошлифовкой кремния до толщины, используемой в микроэлектронике, структура может служить для изготовления различных полупроводниковых устройств.
- Исследование распространения тепла в исследуемой гетероструктуре при азотной температуре показало, что использование мелкокристаллической алмазной пленки со случайной ориентацией кристаллитов в качестве теплоотвода нецелесообразно из-за падения теплопроводности.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Проведенные исследования зависимости тепловых параметров гетероструктур CVD-алмаз/кремний (коэффициента теплопроводности алмаза и граничного теплового сопротивления алмаз/кремний) от условий роста и способа предварительной подготовки поверхности подложки показали, что:
  - 1а) для двух серий образцов, отличавшихся подготовкой поверхности (механическая полировка и химико-механическая полировка приборного качества (device-grade))

различие значений величины граничного теплового сопротивления оказалось ниже чувствительности эксперимента  $3 \cdot 10^{-9} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$ .

- 1б) для образцов с одинаковой обработкой подложки, но различной температурой осаждения величина теплового сопротивления границы разнится от  $\sim 0,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{К / Вт}$  при температуре осаждения  $750^\circ\text{C}$  до  $4,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{К / Вт}$  при температуре осаждения  $700^\circ\text{C}$ .
2. Анализ спектра фотолюминесценции кремниевой подложки показал, что в случае финишной химико-механической полировки приборного качества (device-grade) в подложке возникают дислокации с плотностью  $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$ , что свидетельствует о лучшей адгезии CVD-алмазной пленки при осаждении на подложки кремния в этом случае, по сравнению с финишной механической полировкой.
3. Впервые определена величина теплового сопротивления границы CVD-алмаз кремний, при азотной температуре –  $3,9 \cdot 10^{-8} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$ .

### **Апробация.**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- 1) Конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики», Демидовские чтения, Москва 2006 г.
- 2) Восьмая Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники 2007», г. Екатеринбург, Россия, 30 сентября - 5 октября 2007 г.
- 3) International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena (ICPPP15), г. Левен, Бельгия, 19-23 июля 2009 г.

- 4) 25<sup>th</sup> International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS-25), г. С. Петербург, Россия, 20-24 июля 2009 г.
- 5) Семинары отделения физики твердого тела Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано в научных журналах 5 статей и 4 тезисов докладов в трудах международных и всероссийских семинаров и конференций.

**Личный вклад автора** в работы, выполненные в соавторстве состоял в его участии в разработке методики измерения тепловых параметров многослойных структур, проведении экспериментов по измерению тепловых параметров и фотолюминесценции, обработке и интерпретации результатов.

### **Структура и объём диссертации:**

Диссертация состоит из введения, трех глав, приложения и заключения. Материал изложен на 96 страницах, содержит 38 рисунка, 3 таблицы, 68 наименований в списке литературы.



## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Приведен краткий обзор методов синтеза алмаза. Обоснована актуальность темы диссертации, ее практическое значение, сформулированы основные цели и план исследований.

### **ГЛАВА 1. Химическое осаждение алмаза из газовой фазы. Характеризация гетероструктур CVD-алмаз/кремний.**

В параграфах §1.1 и §1.2 кратко описаны принципы химического газофазного осаждения (chemical vapor deposition – CVD) алмаза. Приведены также параметры осаждения трех серий образцов исследуемых в данной работе; образцы были выращены в лаборатории алмазных материалов Института общей физики РАН (под руководством к.ф.-м.н. В.Г. Ральченко). Характеристики технологических процессов приведены в Табл. 1.

| Таблица 1. Условия синтеза и параметры образцов алмазных пленок на Si: $T_s$ - температура подложки, $t_d$ - время осаждения, $d$ – толщина пленки, $D$ – размер кристаллитов, $P_{\text{СВЧ}}$ – вводимая СВЧ мощность. |            |               |           |           |                        |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|-----------|-----------|------------------------|--------------|
| № серии                                                                                                                                                                                                                  | $T_s$ , °C | $t_d$ , часов | $d$ , мкм | $D$ , мкм | $P_{\text{СВЧ}}$ , кВт | обработка Si |
| I                                                                                                                                                                                                                        | 700        | 4             | 3-6       | 1-1,5     | 3,9                    | абразив      |
| II                                                                                                                                                                                                                       | 750        | 9             | 12-13     | 7-10      | 3,9                    | абразив      |
| III                                                                                                                                                                                                                      | 850        | 10,5          | 8-18      | 7-12      | 3,2                    | хим-механ.   |

В параграфе §1.3 приведены параметры кремния, из которого изготавливались подложки, а также описаны методы их предварительной подготовки.

Последующие параграфы посвящены характеристике структуры.

Параграф §1.4 посвящен исследованию при помощи сканирующей электронной микроскопии поверхности алмазных пленок, выращенных на кремниевой подложке, а также характеристике промежуточного, между алмазом и кремнием, слоя, при помощи просвечивающей электронной микроскопии (для первой серии) (выполнены в ФИАН и в университете Висконсин, США).

В параграфе §1.5 приведены результаты рентгеноструктурных измерений поликристаллической алмазной пленки, и данные о рентгенограммах качания для кремниевой подложки [4].

Характеризация интерфейса гетероструктуры CVD-алмаз/кремний при помощи, просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурный анализ алмазной пленки позволяют сделать заключение о различном способе релаксации напряжения в алмазной пленке. В образцах первой серии напряжения алмазной пленки определяются внутренними напряжениями, возникающими в процессе роста, а появления напряжений, обусловленных различием коэффициентов теплового расширения алмаза и кремния, малы из-за слабой адгезии. Предположительно напряжения релаксировали в промежуточном аморфном слое. Напротив для образцов третьей серии с химико-механической полировкой кремниевой подложки адгезия алмазной пленки к подложке – сильная, поэтому релаксация напряжений произошла путем образования дислокации в кремнии (как стало понятно после исследования кремниевой подложки при помощи фотолюминесценции, подробно см. главу 3). Материалом для подложек служил высокочистый (с удельным сопротивлением  $\rho \sim 3$  кОм·см и временем жизни носителей заряда  $\tau \sim 1$  мс) бездислокационный кремний, выращенный методом Чохральского. Для образцов второй серии релаксации напряжений так

же, как и для первой серии произошла в аморфном промежуточном слое, и дислокации в подложке не образовывались (подробно см. главу 3)

## **ГЛАВА 2. Определение тепловых параметров гетероструктуры CVD-алмаз/кремний.**

В параграфе 2.1 кратко описаны некоторые понятия теории тепловых свойств твердых тел: введено понятие фонона и описаны некоторые свойства системы фононов. Дано представление о граничном тепловом сопротивлении.

Параграф 2.2 посвящен описанию нескольких экспериментальных методов определения коэффициента теплопроводности – метода стационарного теплового потока, лазерного флеш-метода, а также метода используемого для определения тепловых свойств многослойных структур [5].

Параграф 2.3 посвящен экспериментальному определению тепловых параметров гетероструктур CVD-алмаз/кремний. Рис. 1. Для их определения использована методика, основанная на сравнении экспериментального отклика структуры при импульсном лазерном нагреве с теоретическим, полученным при решении задачи о распространении тепла в многослойной структуре с граничным тепловым сопротивлением между слоями ( $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ) (Рис. 2). Тепловые параметры математической модели варьируются при решении задачи так, чтобы добиться наилучшего совпадения рассчитанных и экспериментальных откликов.

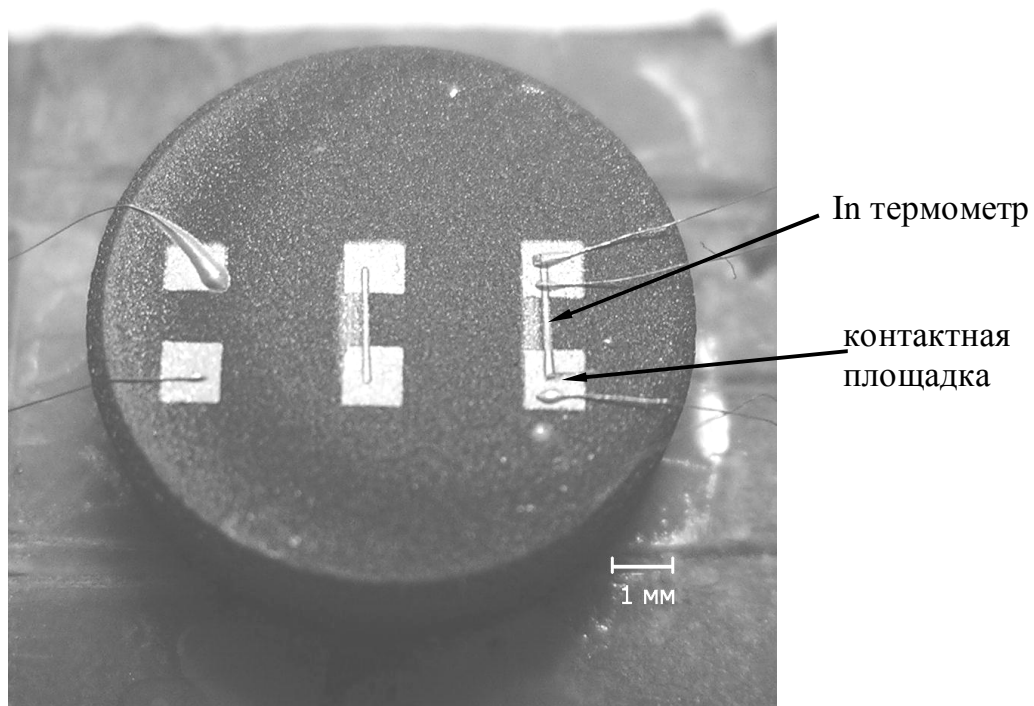


Рис. 1. Фотография исследуемой гетероструктуры поликристаллический алмаз/кремний. На поверхности напылены термометры с контактными площадками.

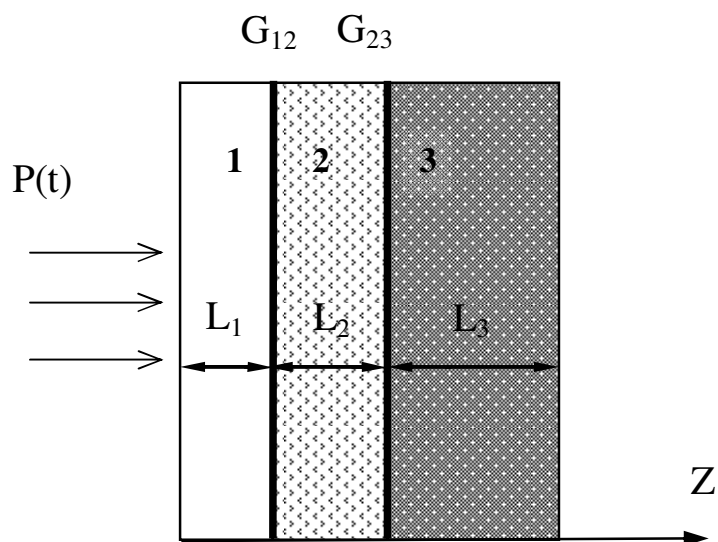


Рис. 2. Геометрия модельной задачи. 1 – индий, 2 – алмаз, 3 – кремний.

Вначале описаны предварительные исследования образца II серии [1\*]. Затем в эксперимент и теоретическую модель были внесены изменения [2\*], с целью упростить модель и приблизить ее к экспериментальным условиям: была существенно (в 8 раз) уменьшена ширина металлической пленки, так как часть пленки на которую не попадает лазерное излучение (размер луча 70 мкм) шунтирует прогретую часть, что уменьшает чувствительности методики; при этом размер пятна, всё же, должен быть много больше толщины алмазной пленки, тепловые параметры которой подлежат определению; в этом случае для анализа экспериментальных данных можно пользоваться одномерной геометрией распространения тепла [3\*]; кроме того, возможная анизотропия коэффициента теплопроводности CVD-алмазной пленки не влияет на оценки тепловых параметров [8\*, 9\*]. Однако, учет теплового сопротивления металлическая пленка/алмаз обязателен даже при комнатной температуре [3\*, 8\*, 9\*]. Полученные данные приведены в Табл. 2.

Таблица 2. Тепловые параметры алмазной пленки и интерфейсов.  $G_{12}$  – тепловое сопротивление границы индий/CVD-алмаз,  $\kappa_2$  – теплопроводность CVD-алмаза,  $G_{23}$  – тепловое сопротивление границы CVD-алмаз/кремний,  $d$  – толщина алмазной пленки.

|           | $G_{12}, \text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ | $\kappa_2, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ | $G_{23}, \text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ | $d, \text{мкм}$ |
|-----------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------|
| I серия   | $(2,45 \pm 0,01) \cdot 10^{-7}$                 | $520 \pm 40$                                      | $(4,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$                   | 3               |
| II серия  | $(4,33 \pm 0,03) \cdot 10^{-8}$                 | $360 \pm 20$                                      | $\leq 2 \cdot 10^{-9}$                          | 12              |
| III серия | $(5,07 \pm 0,05) \cdot 10^{-8}$                 | $600 \pm 50$                                      | $\leq 3 \cdot 10^{-9}$                          | 10              |

Значительное различие откликов, а значит и тепловых параметров образцов первой и второй серий иллюстрируется на Рис. 3.

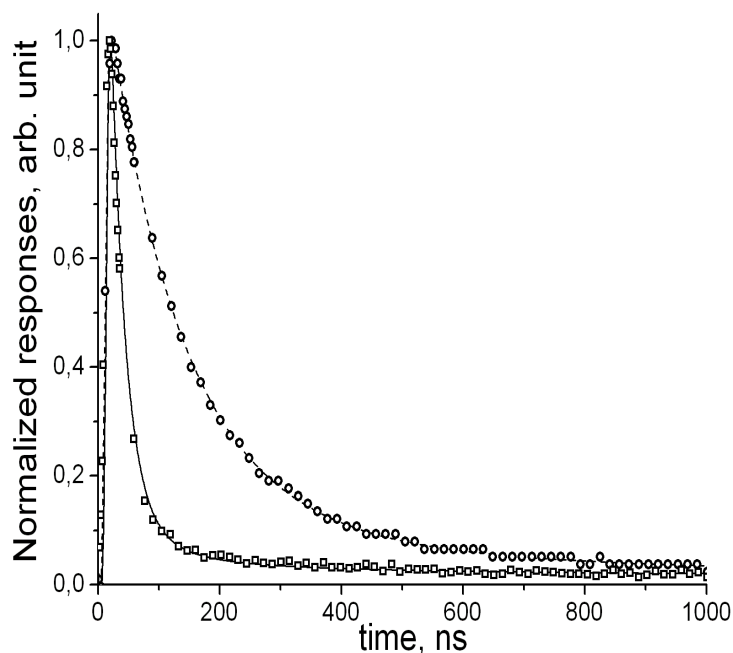


Рис. 3. Нормированные экспериментальные и рассчитанные отклики при значениях параметров из Табл. 1. Расчет - сплошные линии, экспериментальные данные для образцов серий I (кружки) и II (квадраты).

Заметные различия в величине коэффициента теплопроводности алмаза для образцов первой и второй серии мы связываем с различной концентрацией метана в газовой смеси, используемой для осаждения. В литературе приводятся данные о широком разбросе получаемых значений теплопроводности от 120 Вт/(м·К) до 950 Вт/(м·К) в зависимости от концентрации метана [6].

В образцах первой и второй серии также значительно отличается полученная величина граничного теплового сопротивления CVD-алмаз/кремний [3\*]. Можно предположить, что это связано с различным температурным режимом между образцами первой и второй серии, а также с большим временем осаждения для образцов второй серии (см. Табл. 1), и, как следствие, со структурными превращениями, произошедшими в аморфном слое между алмазом и кремнием [7].

Тепловые свойства гетероструктуры исследовались также при температуре 80 К [5\*]. Получены следующие значения параметров: граничное тепловое сопротивление In/алмаз

$(5.74 \pm 0.01) \cdot 10^{-7} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$ , коэффициент теплопроводности алмаза  $330 \pm 10 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$ , граничное тепловое сопротивление CVD-алмаз/кремний  $(3.9 \pm 0.1) \cdot 10^{-8} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$ .

Изменение коэффициента теплопроводности алмазной пленки с  $600 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$  до  $330 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$  близко к литературным данным, приведенным в работе [8] для алмазной пленки толщиной 10 мкм. Отметим, что для наиболее чистых монокристаллов алмаза теплопроводность достигает максимума  $\approx 11000 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$  как раз вблизи температуры жидкого азота [9]. В высококачественном поликристаллическом CVD-алмазе температурный максимум в  $\kappa(T)$  смещен в сторону высоких температур и достигается при 170 К, а теплопроводность при 77 К снижается до  $900 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$  [10]. Для тонких, сильно дефектных и мелкозернистых алмазных пленок температурный максимум пологий, проявляется уже при  $T \approx 200 \text{ К}$  [11], теплопроводность же при 77 К может упасть до  $40 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$ . Таким образом, в силу резкого снижения теплопроводности алмазные пленки (с теплопроводностью при комнатной температуре порядка  $600 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$ ) не имеют особых преимуществ при азотных температурах по сравнению с другими материалами, используемыми для теплоотводящих элементов. Однако, более совершенные поликристаллические алмазные слои, например сильноориентированные [2], могут быть эффективными и при азотных температурах.

Из исследования тепловых свойств структуры CVD-алмаз/кремний можно сделать следующие выводы: определяющее влияние на величину граничного теплового сопротивления имеет температурный режим осаждения; в то время как качество финишной обработки поверхности подложки Si практически не влияет на граничное тепловое сопротивление гетерограницы CVD-алмаз/Si при комнатных температурах.

### **ГЛАВА 3. Фотолюминесценции подложек кремния до и после осаждения поли- кристаллических пленок алмаза.**

В главе 3 анализируются спектры низкотемпературной (5 К) фотолюминесценции кремниевых подложек после осаждения поликристаллических пленок алмаза. Исследуется влияние различных режимов осаждения алмазных слоев и способов подготовки поверхности подложек кремния перед осаждением на возникающие в подложке напряжения и связанные с ними дефекты (модификация кремния). Подложки отличались способом предварительной подготовки поверхности, в одном случае это была механическая полировка «на батисте» алмазным порошком  $d \leq 1$  мкм, в другом химико-механическая полировка с использованием HF (приборного качества (device-grade)).

Для изучения структурных изменений измерялись спектры низкотемпературной (5К) фотолюминесценции подложек кремния в области 0.8-1.2 эВ до и после процессов осаждения. Измерения проводились в условиях стационарного возбуждения образцов излучением с длиной волны 488 нм в геометрии „на отражение“ со стороны противоположной CVD-алмазной пленки.

Обнаружено, что в спектрах фотолюминесценции образцов, в которых подложка подвергалась химико-механической полировке, регистрируются линии  $D_1$  и  $D_2$ , связанные с дислокационным излучением, см. Рис. 4 (кривая 2). Возникновение этих линий, как мы полагаем, определяется хорошей адгезией алмазной пленки и, как следствие, появлением внутренних напряжений, релаксирующих в виде дислокаций. На основе сравнения спектров фотолюминесценции исследуемых подложек и тестовых образцов (кривая 3) была оценена концентрация вводимых дислокаций  $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$  [7\*].

Как видно из Рис. 4 (кривая 4), для образцов, подвергнутых механической полировке, дислокационное излучение не регистрировалось даже при том, что расчетная величина на-



пряжении для них больше [4\*]. Наблюдаемая разница в реакции подложки на напряжения связана предположительно с различием структуры интерфейса алмаз/кремний в сравниваемых образцах. Слишком толстый промежуточный слой [12] на границе раздела способен оказать влияние на адгезию пленки алмаза и быть «стоком» напряжений.

К сожалению, у нас не было возможности получить HRTEM изображения для образцов второй и третьей серии (подобно данным для первой серии).

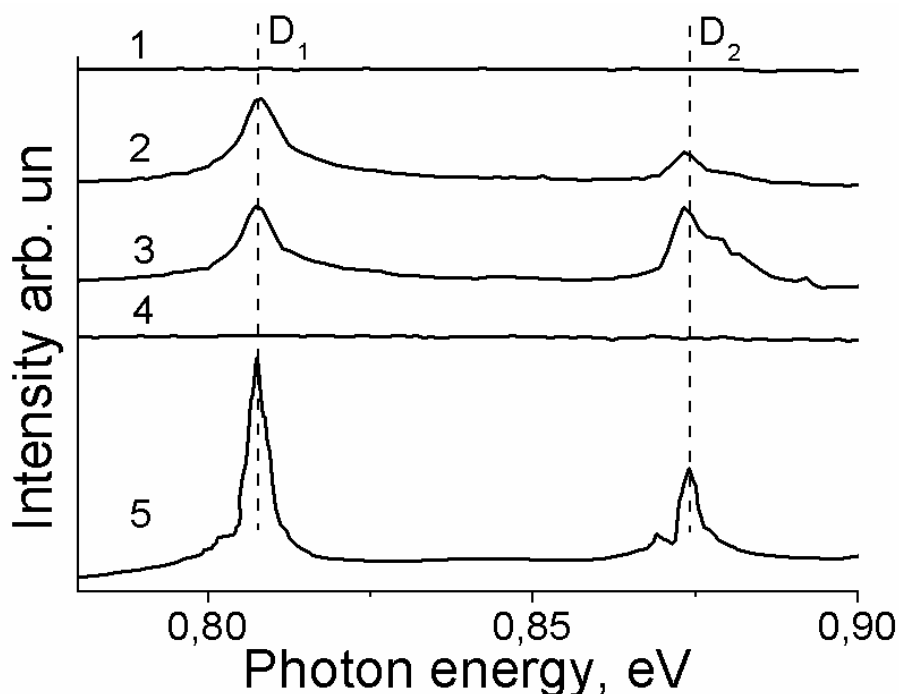


Рис. 4. Фрагмент спектра фотолюминесценции кремния в области дислокационной люминесценции (0,78 – 0,9 эВ), при температуре 5К. Кривая 1 – спектр исходного кристалла (параметры кремния см. стр. 8); кривая 2 – спектр подложки кремния после химико-механической полировки (device-grade) и осаждения алмазной пленки; кривая 3 – спектр тестового образца кремния с плотностью дислокаций  $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$ ; кривая 4 – спектр подложки кремния после механической полировки и осаждения алмазной пленки; кривая 5 – спектр пластически деформированного и отожженного образца кремния из работы [13].

Обнаружено также, что появление дислокаций в кремниевых подложках в результате осаждения алмазных слоев сопровождается изменениями спектров фотолюминесценции в

краевой области, см. Рис. 5. Эти изменения определяются незначительным внедрением примесей в подложку, которое может усиливаться из-за аномальной диффузии по дислокациям. На Рис. 5 (кривая 3) видно значительное увеличение интенсивности линии экситонно-примесного комплекса BE-TO(P,B,Se). К сожалению, линия BE(P,B,Se) значительно уширена и не позволяет однозначно определить примесный состав загрязнения подложки в процессе наращивания слоя алмаза. Однако появление в спектре 3 слабых спектральных линий, так называемых двухэлектронных переходов (TET) однозначно указывает на увеличение концентрации атомов фосфора в подложке, подвергнутой химико-механической полировке. Концентрация фосфора, оцененная по спектрам фотолюминесценции, составляет  $10^{13} \text{ см}^{-3} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$  что согласуется с нашими измерениями удельного сопротивления. Причиной внедрения фосфора может быть аномальная диффузия этой примеси по образовавшимся дислокациям [14].

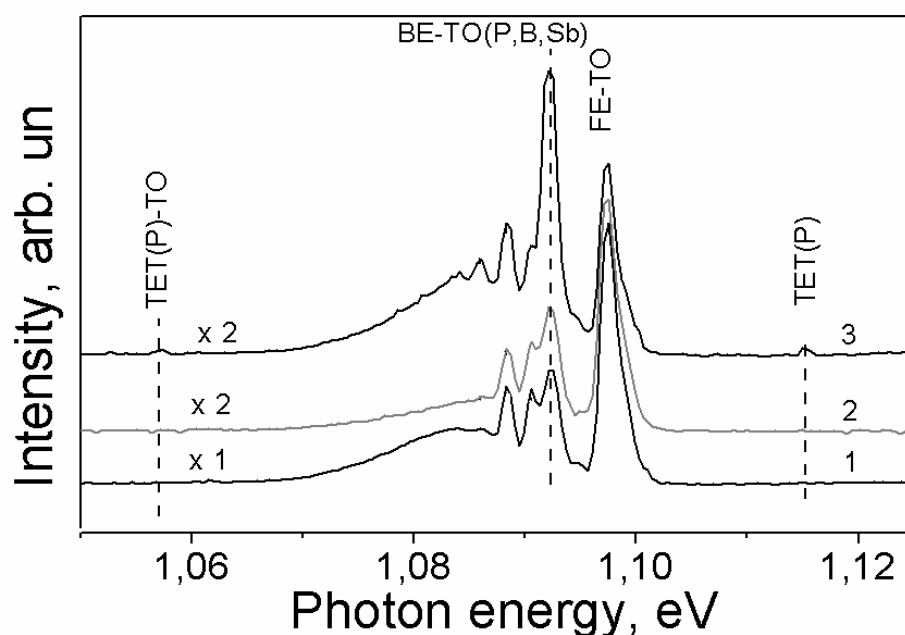


Рис. 5. Фрагменты спектров низкотемпературной (5K) фотолюминесценции исследуемых образцов в краевой области. Кривая 1 – соответствует образцу кремния без алмазной пленки; кривые 2,3 – представляют собой спектры излучения кремниевых подложек подвергнутых механической и химико-механической полировке, соответственно.

### **Основные результаты и выводы.**

- Предложена и осуществлена методика измерения тепловых параметров многослойных структур при импульсном лазерном нагреве, развита математическая модель обработки полученных экспериментальных данных. Тестирование метода проведено на образцах поликристаллических пленок алмаза, выращенных на кремнии в СВЧ-плазмохимическом реакторе. Показано, что при нагреве короткими лазерными импульсами (~10 нс) металлической пленки термометра (In), напыленной на структуры алмаз/Si), из кривых остывания индиевой пленки возможно одновременно определить граничное тепловое сопротивление интерфейса алмаз/Si с точностью до  $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  и теплопроводность алмазной пленки в направлении перпендикулярном росту.
- Найдено, что качество финишной обработки поверхности подложки Si практически не влияет на граничное тепловое сопротивление гетерограницы CVD алмаз/Si при комнатных температурах. При определенных условиях синтеза алмаза, например, при пониженной до 700°C температуре подложки, возможно появление аморфизованного слоя на интерфейсе алмаз/Si, которое вызывает возрастание теплового сопротивления на этой границе на порядок, по сравнению с оптимальным в данном случае температурным режимом (750-800°C).
- Используя методику измерения тепловых параметров многослойных структур при импульсном лазерном нагреве, были определены тепловые параметры структуры In/CVD-алмаз/Si при температуре  $T=80 \text{ К}$ . Из измерений следует, что теплопроводность алмаза при  $T=80 \text{ К}$  снижается вдвое (до 330 Вт/(м·К)) по сравнению с ее значением при комнатной температуре. Впервые определено значение граничного теплового сопротивления CVD-алмаз/кремний, кото-

рое составляет  $3.9 \cdot 10^{-8} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$ , при температуре 80 К, что на порядок выше, чем при  $T=298 \text{ К}$ .

- Показано, что осаждение поликристаллических алмазных пленок в СВЧ плазме на подложки кремния может приводить в определенных условиях к появлению дислокаций в кремнии вследствие, предположительно, напряжений термического характера в системе пленка-подложка, определяемых хорошей адгезией алмазных пленок. В частности, на основе анализа спектров низкотемпературной фотолюминисценции (ФЛ) обнаружено увеличение плотности дислокаций по меньшей мере на три порядка, до  $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$ . Измерения ФЛ информативны при оценке дефектообразования в подложках кремния при синтезе алмазных пленок, в том числе дефектов, таких как дислокации, порождаемых вблизи интерфейса Si/алмаз.
- В спектрах ФЛ регистрируется также уменьшение квантового выхода фотолюминесценции в краевой области (примерно в два раза), а также некоторое усиление линий излучения экситонно-примесных комплексов из-за незначительного внедрения фосфора (на уровне  $\sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) в процессе осаждения.
- Предложена диагностика кремния с помощью измерения фотолюминесценции в области дислокационного излучения (0.8-0.9 эВ), что может служить простым, неразрушающим методом определения качества адгезии алмазной пленки на кремниевой подложке.

### **Приложение.**

В приложении приведено подробное описание математической модели отклика исследуемых структур на импульсное лазерное облучение. В данном случае откликом явля-

ется изменение сопротивления тонкой металлической пленки, напыленной на поверхность исследуемой структуры. Полагая, что вызванное импульсным нагревом локальное изменение удельного сопротивления в пленке мало, можно показать, что изменение её сопротивления пропорционально среднему перегреву. Таким образом, задача моделирования отклика сведена к исследованию релаксации тепла в слоистой структуре металлическая пленка/CVD-алмаз/кремний (см. Рис.2) с граничными тепловыми сопротивлениями между слоями.

По классификации, принятой в математической физике решаемая задача является ко-эффективной задачей теплообмена и относится к классу обратных задач [15].

Для математического описания процесса теплопереноса используется система уравнений теплопроводности относительно перегрева (превышение температуры над температурой эксперимента -  $20^{\circ}\text{C}$ ). Из-за того, что в первом слое происходит поглощение лазерного излучения, уравнение теплопроводности для первого слоя является неоднородным. Поэтому система уравнений теплопроводности для нашего случая в переменных координата-время не решается аналитически. Поэтому система уравнений была преобразована в переменные координата-частота, в этих переменных система решалась аналитически. Временная зависимость перегревов в слоях была получена путем обратного преобразования Фурье. Приводится эффективный алгоритм вычисления отклика на компьютере.

#### **Список публикаций по теме диссертации:**

1\*. Д. Ф. Аминев, А. Ю. Клоков. Граничное тепловое сопротивление в структурах CVD-алмаз/кремний // В сб. Тезисы доклада на конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики» Демидовские чтения. Москва, 2006. Стр. 79.

2\*. Т. И. Галкина, Д. Ф.Аминев, А. Ю. Клоков, А. И. Шарков, В.Г.Ральченко. Могослоидная структура In/CVD-алмаз/Si: тепловые параметры слоев и границ раздела для структур кремний на алмазе (SOD)// В сб. Тезисы докладов VIII Российской конференции по физике полупроводников. Екатеринбург, 2007. Стр. 420

3\*. А.Ю.Клоков, Д.Ф.Аминев, А.И.Шарков, В.Г.Ральченко, Т.И.Галкина. Тепловые параметры слоев и границ раздела в структурах кремний на алмазе // Физика Твердого Тела, том 50, выпуск 12, стр. 2167-2173, 2008 г.

4\*. Д.Ф.Аминев, В.С.Багаев, Т.И.Галкина, А.Ю.Клоков, В.С.Кривобок, В.Г.Ральченко, А.В.Савельев. Фотолюминесценция кремния после осаждения поликристаллических пленок алмаза // Физика и Техника Полупроводников, том 43, выпуск 9 стр. 1199-1203, 2009 г.

5\*. Д. Ф. Аминев, А.Ю. Клоков, Т. И. Галкина, А. И. Шарков, В.Г. Ральченко. Тепловое сопротивление границы в структуре кремний-на-алмазе при температуре 80 К // Краткие сообщения по физике ФИАН, 2010, №5, (в печати).

6\*. Victor S. Bagaev, Denis F. Aminev, Tatiana I. Galkina\*, Andrey Yu. Klovov, Vladimir S. Krivobok, Victor G. Ralchenko. Analysis of photoluminescence spectra as a detection method of tension in silicon substrates after the polycrystalline diamond deposition // 25th International Conference on Defects in Semiconductors. Book of abstracts St. Petersburg, 2009. P. 157.

7\*. V.S. Bagaev, D.F. Aminev, T.I. Galkina, A.Yu. Klovov, V.S. Krivobok, V.G. Ralchenko. Analysis of photoluminescence spectra for detection of stress-induced defects in silicon substrates after the polycrystalline diamond deposition. Physica B: Condensed Matter, volume 404 (2009), p.4616.

8\*. A. Klovov, D. Aminev, A. Sharkov, T. Galkina, V. Ralchenko. Determination of layers and interface thermal parameters in Silicon-on-Diamond structures by the photothermal method// International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena (ICPPP15). Book of abstracts p. 289

9\*. A. Klovov, D. Aminev, A. Sharkov, T. Galkina, V. Ralchenko. Evaluation of thermal parameters of layers and interfaces in Silicon-on-Diamond structures by a photothermal method// Journal of Physics: Conference Series 214 (2010) 012108.

**Список цитируемой литературы:**

1. Yutaka Anoda, Takeshi Tachibana, Koji Kobashi, Diamond and Related Materials, **10** (2001), p. 312.
2. A. Aleksov, T.X. Li, N. Govindaraju, J.M. Gobien, S.D. Wolter, J.T. Prater, Z. Sitar. Diamond and Related Materials, **14** (2005), p. 308.
3. J.E. Graebner, J.A. Mucha, F.A. Baiocchi, Diamond and Related Materials, **5** (1996), p. 682
4. V. Ralchenko, T. Galkina, A. Klovov, A. Sharkov, S. Chernook, V. Martovitsky, in D. Flandre et al. (eds), "Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structure and Devices Operating in a Harsh Environment", Kluwer, 2005, p. 77.
5. K. E. Goodson, O. W. Käding, M. Rösler, and R. Zachai, J. Appl. Phys., **77** (1995), p. 1385.
6. J.E. Graebner, V.G. Ralchenko, A.A. Smolin, E.D. Obraztsova, K.G. Korotushenko, V.I. Konov, Diamond and Related Materials, **5** (1996), p. 693.
7. D. Wittorf, W.Jäger, K. Urban, T. Gutheit, H. Güttler, R. Zachai, Diamond and Related Materials, **6** (1997), p.649.
8. D.T. Morelli, C.P. Beetz, T.A. Perry, J. Appl. Phys., **64** (1988) p. 3063.
9. R. Berman and M. Martinez. Diamond Res.(suppl. to Industr. Diamond Rev.), **7** (1976).
10. A.V. Inyushkin, A.N. Taldenkov, V.G. Ral'chenko, V.I. Konov, A.V. Khomich, R.A. Khmel'nitski, JETP **107**, (2008) p. 462.

11. W.L. Liu, M. Shamsa, I. Calizo, A.A. Balandin, V. Ralchenko, A. Popovich, A. Save-  
liev, Appl. Phys. Lett, **89** (2006) 171915.
12. L.C. Nistor, J. Van Landuyt, V.G. Ralchenko, A.A. Smolin, K.G. Korotushenko, E.D.  
Obraztsova, J. Mater. Res., **12** (1997) p. 2533.
13. R. Sauer, J. Weber, J. Stolz, E.R. Weber, K.H. Küster and H. Allexander, Appl. Phys. A  
**36**, (1985) p. 1.
14. Энциклопедия технологии полупроводниковых материалов, под редакцией К.А.  
Джексона, В. Шретера. (М., Изд-во Водолей, 2007).
15. Вычислительная теплопередача. А.А Самарский, П.Н. Вабищевич. Москва, изда-  
тельство «Едиториал УРСС», 2003 г.