

УДК 536.241

ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ В СТРУКТУРЕ КРЕМНИЙ-НА-АЛМАЗЕ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 80 К

Д. Ф. Аминеv, А. Ю. Клоков, Т. И. Галкина²,
А. И. Шарков, В. Г. Ральченко¹

Исследовано распространение тепла при температуре жидкого азота в гетероструктуре, состоящей из поликристаллической алмазной пленки, осажженной из углеводородной плазмы на ориентированную кремниевую подложку. Использована методика измерения кинетики остывания тонкопленочного индиевого термометра, нанесенного на алмазную пленку, после нагрева наносекундными импульсами азотного лазера. Экспериментальные данные сравнены с рассчитанными в рамках теории теплопроводности для многослойных систем. Проведенный анализ позволил определить одновременно теплопроводность алмазной пленки и граничное тепловое сопротивление границ алмаз/Si и In/алмаз при азотной температуре.

Ключевые слова: граничное тепловое сопротивление, гетероструктура алмаз/кремний.

Алмаз является перспективным материалом для создания элементной базы высокотемпературной радиационно стойкой электроники. Использование алмаза в СВЧ-приборах позволяет увеличивать их мощность, КПД и предельную частоту. Еще одной областью применения алмаза является изготовление теплоотводов (теплостокков). Алмазные теплоотводы совместимы с различными материалами, используемыми в полупроводниковых приборах. В частности, развивается технология совмещения кремния и алмаза, и получения структур “кремний на алмазе” – КНА (silicon on diamond – SOD)

¹ Учреждение Российской академии наук Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова 38.

² E-mail: galkina@lebedev.ru

[1]. Одним из методов реализации этой концепции является выращивание из газовой фазы (CVD-процесс) поликристаллического алмазного теплоотводящего слоя на монокристаллической подложке кремния.

Однако для реализации эффективных теплоотводов может возникнуть затруднение из-за так называемого граничного теплового сопротивления. Известно, что любая граница раздела двух сред обладает тепловым сопротивлением R_{bd} , то есть при протекании тепла на границе сред появляется скачок температуры. Тепловое сопротивление определяется как отношение скачка температуры к тепловому потоку, протекающему через область единичной площади [2]. В простейшем случае это явление связано с различием упругих параметров и плотности двух сред, что вызывает рассеяние фононов на границе. В реальности прохождение фононов затруднено еще и наличием различных несовершенств (шероховатость, границы зерен и пр.) на интерфейсе. Поэтому граничное тепловое сопротивление структур сильно зависит от технологических условий роста и от предварительной подготовки подложки.

Наибольшее влияние тепловое сопротивление оказывает при гелиевых температурах; R_{bd} на границе твердых тел и жидкого гелия (сопротивление Капицы) очень велико и сильно препятствует теплоотводу. В работе [3] показано, что при освещении образца, закрепленного на хладопроводе, непрерывным лазером с мощностью всего 50 мВт скачок температуры на границе образца и гелия достигает долей градуса.

В данной работе исследование тепловых свойств многослойной структуры In/CVD-алмаз/Si распространено на область криогенных температур. В предыдущей работе [4] нами было определено значение тепловых параметров такой структуры для нескольких серий образцов, выращенных при различных условиях; измерения проводились при комнатной температуре. Полученное весьма низкое значение граничного теплового сопротивления CVD-алмаз/кремний, менее $3 \cdot 10^{-9}$ (м²·К)/Вт, означает, что оно практически не препятствует теплоотводу, и близко к значению, определенному иным способом в работе [5] – $2 \cdot 10^{-9}$ (м²·К)/Вт.

Однако алмазные теплоотводы могут использоваться в устройствах, работающих не только при комнатной температуре: так, существует проблема с отводом тепла из активной области полупроводниковых лазеров, работающих при температуре жидкого азота (для уменьшения порога генерации).

Температурная зависимость граничного теплового сопротивления алмаз/кремний при азотных температурах не известна, однако можно предположить, что значение R_{bd} растет с понижением температуры: так, из литературы известно [6], что при низких

температурах для R_{bd} двух твердых тел характерна зависимость T^{-3} . Ограничения на области применимости вызвано тем, что в модели заложена линейная дисперсия фононов, то есть модель применима при температурах много меньше температуры Дебая. При увеличении температуры зависимость $R_{bd}(T)$ становится более слабой [2]. Температура Дебая как кремния – 645 К, так и алмаза – 2240 К достаточно высока, то есть можно предполагать сильное увеличение R_{bd} алмаз/кремний при температуре 80 К по сравнению со значением при 300 К. Таким образом задача определения значения граничного теплового сопротивления при $T = 80$ К, решаемая в настоящей работе, вызвана практическим интересом.

Метод нахождения тепловых параметров структуры основан на сравнении экспериментального отклика (временной зависимости сопротивления) индиевой пленки, нанесенного на образец, с расчетным, и подробно описан в [4].

Эксперимент. В данной работе использовались поликристаллические CVD-алмазные пленки, осажденные из микроволновой плазмы (состоящей из CH_4 – 2.5% и H_2 – 97.5%) при давлении 90 Торр на полированную подложку из чистого кремния [100] диаметром 10 мм и толщиной 3 мм, нагретой до температуры 720–750 °С. Толщина алмазных пленок составляла 18 мкм при времени осаждения 20 часов. Размер кристаллов варьируется от 3 до 10 мкм.

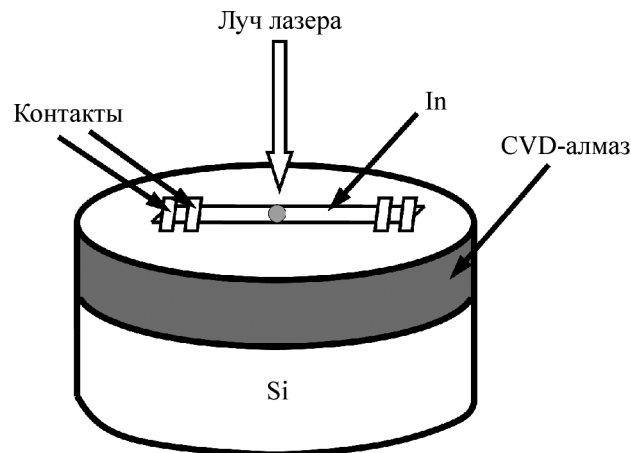


Рис. 1: Схематическое изображение исследуемой гетероструктуры In/CVD-алмаз/Si.

На алмазную пленку термически напыляли пленку индия в виде полоски толщиной 400 нм и шириной 200 мкм. После напыления и подсоединения контактов по четырехзондовой схеме, проводились измерения зависимости сопротивления пленок от температуры (рис. 1). Через пленку пропускался ток около 2.5 мА.

Индиевая пленка нагревалась импульсом азотного лазера ЛГИ-21 ($\lambda = 337$ нм, $\tau = 8$ нс, энергия в импульсе до 6 мкДж). Излучение фокусировалось в пятно диаметром 70 мкм при помощи линзы, закрепленной на двухкоординатном шаговом столе (шаг позиционирования 5 мкм), что позволяло осуществлять сканирование поверхности образца лазерным лучом.

Изменение падения напряжения на потенциальных контактах при импульсном нагреве пленки усиливалось широкополосным малошумящим усилителем и регистрировалось цифровым осциллографом TDS-1012 (частота дискретизации 1 ГГц). Процесс сбора данных управлялся компьютером.

Образец помещался в вакуумный объем азотного криостата и крепился на хладопроводе, подсоединенном к азотному объему. Температура бани измерялась при помощи полупроводникового термометра ТПК.

Результаты и обсуждение. Неизвестными являются следующие параметры структуры – тепловое сопротивление In/CVD-алмаз и CVD-алмаз/кремний, также неизвестно точное значение коэффициента теплопроводности исследуемой пленки алмаза. Из литературы известно, что значение коэффициента теплопроводности CVD-алмазной пленки при комнатной температуре может лежать в интервале от 700 до 2200 Вт/К·м [7]; в более поздней работе [8] указана еще более широкая область вариации теплопроводности, от 10 до 2200 Вт/К·м. В работе [9] исследована поликристаллическая алмазная пластина, выращенная в той же установке, что и исследуемая гетероструктура. Полученное значение коэффициента теплопроводности в направлении, перпендикулярном росту, составляло 1900 Вт/К·м. Однако следует уточнить, что это значение относится к свободной алмазной пластине, с которой были удалены кремниевая подложка и прилегающий к подложке дефектный слой толщиной 50 мкм.

Кроме того, возникает вопрос о применимости модели, основанной на законе Фурье $P = -k\nabla T$ в нашем случае (P – поток тела, k – теплопроводность). Для оценки воспользуемся критерием, приведенным в [10] – относительное изменение температуры на длине свободного пробега фонона должно быть много меньше единицы.

$$\frac{l_p |\nabla T|}{T} \ll 1, \quad (1)$$

где ∇T – градиент температуры, l_p – средняя длина свободного пробега фононов, связь которой с теплопроводностью приведена в [11]

$$l_p = \frac{3 \cdot k}{C \cdot \rho \cdot v}, \quad (2)$$

где C – удельная теплоемкость, v – скорость звука в среде, ρ – плотность. Подставив (2) в (1), и используя закон Фурье, получим формулу для оценки изменения температуры на длине свободного пробега фонона

$$\frac{l_p |\nabla T|}{T_0} = l_p \cdot \frac{P}{k} \cdot \frac{1}{T_0} = \frac{3 \cdot P}{C \cdot v \cdot \rho \cdot T_0}, \quad (3)$$

где P – плотность потока тепловой энергии, T_0 – температура окружающей среды, в нашем случае 80 К. Используя данные справочника [12], получим значения критерия (3) при азотной температуре для слоев исследуемой структуры: индий – 0.032; CVD-алмаз – 0.35; кремний – 0.035.

Как указано выше, метод определения тепловых параметров структуры основан на сравнении экспериментального отклика пленки (временной зависимости изменения сопротивления) с расчетной кривой. Расчетная кривая получалась из решения в рамках классической теории теплопроводности одномерной задачи о распространении тепла в трехслойной структуре с граничным тепловым сопротивлением между слоями. Путем варьирования искомых параметров достигалось наилучшее согласие экспериментальных и расчетных данных.

Лазерное излучение вызывает не только нагрев пленочного сенсора, по динамике остывания которого и определяются тепловые параметры структуры, но и другие процессы, которые дают вклад в регистрируемый электрический сигнал, показанный на рис. 2(а). Для простоты назовем нетепловую часть сигнала “паразитной” (рис. 2(б)), так как нас интересует только процесс нагрева и остывания индиевой пленки. По-видимому, возникновение “паразитного” сигнала объясняется наличием контактной фотоЭДС, подробным исследованием природы которой мы не занимались.

Для того чтобы выделить тепловую составляющую, из сигнала с током был вычтен сигнал без тока (снятый в той же точке), однако полностью избавиться от нетеплового сигнала не удалось. На рис. 3 в интервале 20–40 нс видно наличие острого пика, который является остаточным “паразитным” сигналом. Наличие этого пика несколько усложняет процедуру подгонки формы расчетной кривой. Еще одним фактором, осложняющим определение тепловых параметров, является наличие довольно значительной наводки, которая проявляется в виде сильного зашумления кривой в интервале 0 до 200 нс.

Наименьшее различие экспериментальной и расчетной кривой наблюдалось при следующем значении параметров: граничное тепловое сопротивление $\text{In}/\text{алмаз}$ $5.74 \pm 0.01 \cdot 10^{-7}$ (м²·К)/Вт, коэффициент теплопроводности алмаза 330 ± 10 Вт/(м·К), граничное тепловое сопротивление CVD-алмаз/кремний $3.9 \pm 0.1 \cdot 10^{-8}$ (м²·К)/Вт.

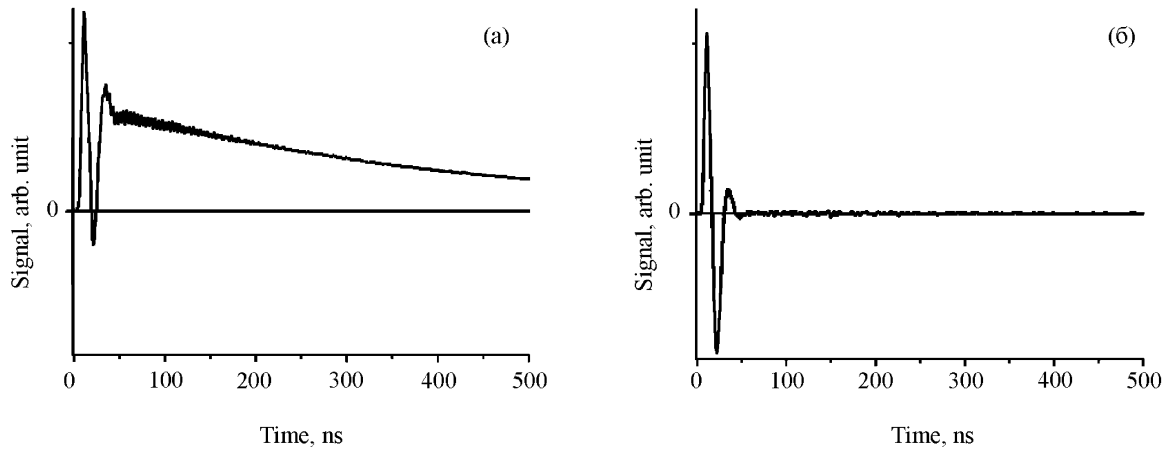


Рис. 2: Отклик In при температуре 80 К. (а) Ток через пленку 2.5 мА; (б) ток через пленку 0 мА.

Из сравнения со значениями тепловых параметров при комнатной температуре, взятыми из [4], видно, что значение граничного теплового сопротивления In/CVD-алмаз возросло на порядок с $5.07 \cdot 10^{-8}$ (м²·К)/Вт до $5.74 \cdot 10^{-7}$ (м²·К)/Вт, что достаточно близко к литературным данным для граничного теплового сопротивления алмаза и некоторых металлов – Al и Ti [13].

Снижение коэффициента теплопроводности алмазной пленки вдвое, с 600 Вт/(м·К) до 330 Вт/(м·К), близко к литературным данным, приведенным в работе [14] для алмазной пленки толщиной 10 мкм. Отметим, что для наиболее чистых монокристаллов алмаза теплопроводность достигает максимума $k \approx 11000$ Вт/(м·К) как раз вблизи температуры жидкого азота [15]. В высококачественном поликристаллическом CVD-алмазе температурный максимум в $k(T)$ смещен в сторону высоких температур и достигается при 170 К, а теплопроводность при 77 К снижается до 900 Вт/(м·К) [9]. Для тонких, сильно дефектных и мелкозернистых алмазных пленок температурный максимум пологий, наблюдается уже при $T \approx 200$ К [16], теплопроводность при 77 К может упасть до 40 Вт/(м·К). Таким образом, в силу резкого снижения теплопроводности, дефектные алмазные пленки (с теплопроводностью при комнатной температуре порядка 600 Вт/(м·К)) не имеют особых преимуществ при криогенных температурах по сравнению с другими материалами, используемыми для теплоотводящих элементов. Однако более совершенные поликристаллические алмазные слои, например, сильноориентированные [1], могут быть эффективными и при азотных температурах.

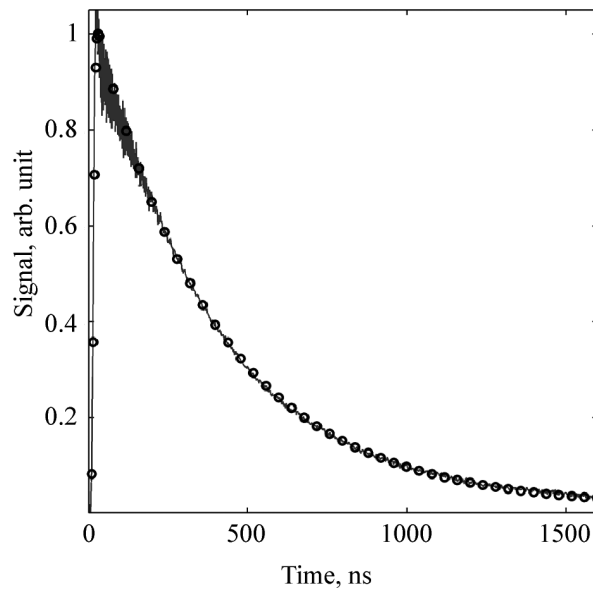


Рис. 3: Сравнение экспериментальной и расчетной кривых. Сплошная линия – экспериментальные данные; кружки – модельный расчет.

Заключение. Используя методику измерения тепловых параметров многослойных структур при импульсном лазерном нагреве, предложенную и опробованную в [4], были определены тепловые параметры структуры In/CVD-алмаз/Si при температуре $T = 80$ К. Из подгонки к модели следует, что теплопроводность алмаза при $T = 80$ К снижается вдвое (до 330 Вт/(м·К) по сравнению с ее значением при комнатной температуре. Полученная величина граничного теплового сопротивления In/CVD-алмаз близка к литературным данным. Впервые определено значение граничного теплового сопротивления CVD-алмаз/кремний, которое составляет $3.9 \cdot 10^{-8}$ (м²·К)/Вт при температуре 80 К, что на порядок выше, чем при $T = 298$ К.

Авторы благодарны С. Г. Черноок за электронно-микроскопические измерения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Aleksov, X. Li, N. Govindaraju, et al., *Diamond and Related Materials* **14**, 308 (2005).
- [2] E. T. Swartz and R. O. Pohl, *Reviews of Modern Physics* **61**, 605 (1989).
- [3] A. A. Manenkov, G. N. Mikhailova, A. S. Seferov, V. D. Chernetskii, *Fiz. Tverd. Tela (Leningrad)* **16**, 2719 (1974).

- [4] A. Yu. Klovov, D. F. Aminev, A. I. Sharkov, et al., *Physics of the Solid State* **50**, 2263 (2008).
- [5] H. Verhoeven, A. Flöter, H. Reis, et al., *Appl. Phys. Lett.* **71**, 1331 (1997).
- [6] W. A. Little, *Can. J. Phys.* **37**, 334 (1959).
- [7] J. E. Graebner, *Diamond and Related Materials* **4**, 1196 (1995).
- [8] Maki A. Angadi et al., *J. Appl. Phys.* **99**, 114301 (2006).
- [9] A. V. Inyushkin, A. N. Taldenkov, V.G. Ral'chenko, et al., *ЖЭТФ* **107**, 462 (2008).
- [10] В. Л. Гуревич, *Кинетика фононных систем* (М., Наука, 1980).
- [11] С. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 7 ed. (Wiley, NY, 1996).
- [12] *Физические величины. Справочник*, под ред. И. С. Григорьева и Е. З. Мейликова (М., Энергоатомиздат, 1991).
- [13] R. J. Stoner and H. J. Maris, *Phys. Rev. B* **48**, 16373 (1993).
- [14] D. T. Morelli, C. P. Beetz, and T. A. Perry, *J. Appl. Phys.* **64**, 3063 (1988).
- [15] R. Berman and M. Martinez, *Diamond Res.(suppl. to Industr. Diamond Rev.)*, 7 (1976).
- [16] W. L. Liu, M. Shamsa, I. Calizo, et al., *Appl. Phys. Lett.* **89**, 171915 (2006).

Поступила в редакцию 26 ноября 2009 г.