ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

УДК 621.315.592

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В СТРУКТУРАХ ИМПУЛЬСНЫХ СИЛОВЫХ ПРИБОРОВ ВБЛИЗИ ПЛОСКОСТЕЙ СПАЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН В ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ «СТОЛБЫ»*

© 2011 г. А. Л. Глазов¹, В. А. Козлов², О. Корольков³, К. Л. Муратиков¹ ¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, ²НПО «ФИД-Техника»,

³Таллиннский технический университет, Эстония

Разработан метод лазерной термоволновой диагностики процессов теплопереноса в межсоелинениях полупроволниковых диодных структур высоковольтных импульсных ключейразмыкателей, собранных по технологии «столбов». Предложена теоретическая модель процессов распространения тепловых волн в подобных структурах с учетом технологических особенностей подготовки поверхностей полупроводниковых элементов, слоев спайки или сварки. Показано, что лазерные термоволновые методы позволяют диагностировать качество теплофизических контактов между элементами ключей-размыкателей при различных технологиях их соединений

Ключевые слова: контактный теплоперенос, спаянные или сварные соединения, лазерная термоволновая диагностика, высоковольтные полупроводниковые переключатели.

Введение

Работа современных силовых полупроводниковых приборов при переходах между своими стабильными состояниями сопровождается выделением значительных тепловых мощностей. Для мощных полупроводниковых приборов плотность тепловыделения в рабочих областях достигает настолько высоких значений, что тепловые эффекты и режимы охлаждения часто становятся определяющими факторами, ограничивающими дальнейший прогресс в области улучшения основных характеристик таких приборов [1]. В связи с этим вопросы изучения тепловых процессов, а также разработки методов их диагностики становятся одной из первостепенных задач физики и техники силовых полупроводниковых приборов.

Некоторые типы полупроводниковых силовых приборов требуют особенно тщательного подбора технологических и конструктивных решений в вопросе отвода тепла. К приборам такого типа в первую очередь следует отнести импульсные высоковольтные полупроводниковые ключи-размыкатели на основе специальных диодных структур [2-4]. Конструктивно такие твердотельные ключи-размыкатели представляют собой сборки из последовательно соединенных диодных элементов, количество которых в сборке может составлять несколько десятков штук. Следует отметить, что отвод тепла от дискретных полупроводниковых структур внутри таких сборок осуществляется, как правило, последовательно через все внутренние диодные элементы столба к одной или обеим крайним поверхностям сборки, где тепло рассеивается с помощью теплоотводящих устройств-радиаторов.

Очевидно, что используемые для сборки столбов материалы и сама технология изготовления соединений между диодными структурами в существенной мере определяют тепловой режим работы, как дискретных полупроводниковых структур, так и всего ключа-размыкателя в целом. Поскольку подобные приборы используют для коммутации больших мощностей (с плотностью более 1 МВт/см³) за сверхмалое время (порядка 1 нс), то особенно

^{*} Работа написана по материалам доклада, представленного на VIII Международной конференции «Кремний-2011».

важную роль в них играют динамические процессы теплопереноса. При этом для предотвращения локальных перегревов также большое значение имеет однородность этих процессов по площади и объему полупроводниковых кристаллов. Именно локальные динамические тепловые режимы для импульсных силовых приборов часто определяют их предельные коммутационные возможности и надежность. Важность и необходимость осуществления контроля локальных динамических условий распространения тепла в современных силовых импульсных полупроводниковых приборах требует разработки новых методов их тестирования, так как стандартные методики измерений интегральных и стационарных тепловых характеристик сборок силовых приборов абсолютно не отвечают новым требованиям по контролю динамики отвода тепла от кристаллов таких приборов.

Методика оценки теплофизических свойств контактных соединений

Ниже рассмотрены результаты разработки одного из возможных методов решения задач подобного рода. Оценку качества динамических теплопроводящих свойств контактов между отдельными элементами многоэлементных силовых полупроводниковых ключей проводили с помощью лазерной термоволновой фотодефлекционной (ФД) методики. В этой методике модулированное во времени и сфокусированное на торцевую поверхность исследуемого объекта (сборки диодных структур) излучение лазера накачки, сильно поглощающееся материалом объекта, использовали для локального возбуждения тепловых волн с заданной частотой. Регистрацию генерируемых тепловых волн осуществляли по отклонению пучка зондирующего лазера тепловой линзой, формирующейся в воздушной среде вблизи поверхности объекта при возбуждении в нем тепловых волн. Подобный подход авторы ранее с успехом использовали для регистрации нестационарных



Рис. 1. Геометрия расположения образца и возбуждающего лазерного излучения:

1, 3, 5— полупроводниковые области ключа– размыкателя; 2, 4— зоны спайки; 6— пучок возбуждающего лазерного излучения; 7— тепловая линза теплофизических процессов в полупроводниках и керамиках [5—7].

На рис. 1 представлена схема измерений с геометрией расположения основных областей исследуемого образца и пучка лазера накачки, генерирующего тепловые волны. В рассматриваемой методике наличие теплового сопротивления у контакта между отдельными элементами полупроводниковых ключей способствует существенному увеличению ФД– сигнала по мере приближения пучка накачивающего лазера к контакту со стороны любой из полупроводниковых областей.

Описание образцов и характеристик экспериментальной установки

Исследовали две группы образцов, собранных в столбы с использованием различных технологий соединения пластин. Для первой группы приборов сборку осуществляли с помощью стандартной пайки шлифованных или полированных диодных структур, для второй — путем сплавления или диффузионной сварки полированных диодных структур через тонкие слои алюминия. Пластины диодных структур шлифовали «свободным» абразивом (зернами SiC) с размером зерна основной фракции 14 мкм, а их полировку — химико-механическим способом с использованием суспензии аэросила.

Приборы первой группы спаивали припоем ПОС 63 (сплав олова и свинца) при температуре 200—210 °С. Перед пайкой на пластинах формировали омические контакты путем химического осаждения никеля на поверхность диодных структур и его вжигания в кремний в вакууме при температуре 650—660 °С. Технология формирования никелевых контактов к полированным и шлифованным пластинам диодных структур была одинаковой.

Перед сплавлением диодных структур в столбы для образцов второй группы на чистые полированные поверхности готовых приборов сначала напыляли слой алюминия толщиной 7—8 мкм, после чего их складывали в стопку-столб и под давлением примерно 10^2 кПа сплавляли друг с другом в вакууме при температуре ~700 °С. Диффузионную сварку полированных диодных пластин осуществляли через алюминиевую фольгу толщиной 30 мкм в вакууме под давлением примерно 10^5 кПа при температуре ~500 °С.

Для оценки качества теплопередачи контактом исследовали характер изменения Φ Д–сигнала по мере приближения зоны генерации тепловых волн к контакту со стороны одной из полупроводниковых областей. В качестве лазера накачки использовали аргоновый лазер ЛГН–503 с длиной волны $\lambda = 0,514$ мкм, излучение которого сильно поглощалось в кремнии, поэтому генерация тепловых волн в нем носила чисто поверхностный характер. Излучение лазера накачки модулировали с частотой 1 кГц

и фокусировали на поверхность образца в пятно диаметром 2 мкм. Для зондирования использовали пучок Не—Ne-лазера Meles Griot 05–LHP–151. Его излучение фокусировали в область тепловой линзы над поверхностью образца. При этом радиус пучка в этой области составлял ~15 мкм. ФД–сигнал образовывался в результате изменения направления распространения пучка зондирующего лазера после тепловой линзы («мираж» эффект), которое приводило к изменению положения его центра на координатно– чувствительном фотоприемнике и образованию соответствующего электрического сигнала.

Теоретическая модель

Для количественной оценки теплофизических свойств контактов авторами была разработана теоретическая модель, учитывающая наличие слоя металла между полупроводниковыми элементами. Качество теплопроводящих свойств контактов, выполненных по различным технологиям, оценивали путем сравнения измеренных и расчетных характеристик ФД-сигналов. С учетом того, что возбуждение тепловых волн осуществляли лазерным источником с гармоническим законом изменения во времени, т. е. зависимость температуры от времени имела форму $T_j(x, y, z, t) = T_j(x, y, z, \omega)e^{i\omega t}$, процессы теплопроводности в областях 1, 2 и 3 (см. рис. 1) описывали с помощью уравнений

$$\Delta T_j - \frac{i\omega}{\kappa_j} T_j = -\frac{Q_j(x, y, z, \omega)}{K_j}, \qquad (1)$$

где $Q_j(x, y, z, \omega)$ — источник тепла, возбуждающий тепловые волны в области j; κ_j и K_j — температуро- и теплопроводности материала области j соответственно.

Уравнение (1) решали с учетом граничных условий на границе раздела исследуемого объекта с воздушной средой (см. рис. 1, плоскость z = 0), а также на поверхностях контакта полупроводника со слоем припоя. Они включали в себя равенство температур и тепловых потоков на всех указанных границах. При этом имели в виду, что в данной работе в ФД-экспериментах использовали только переменную составляющую температуры с частотой 1 кГц. Поскольку установлено, что при частоте более 10² Гц число Био существенно меньше единицы для образцов из большинства материалов [8], то расчет характеристик тепловых волн в образце проводили без учета конвективного отвода тепла в воздушную среду. Таким образом, процесс генерации тепловых волн в исследуемой структуре можно рассматривать при следующих граничных условиях для тепловых потоков

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial T_2}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial T_3}{\partial z} \right|_{z=0} = 0;$$

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}\Big|_{x=0} = K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=0}; \quad K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=-l} = K_1 \frac{\partial T_3}{\partial x}\Big|_{x=-l}, \quad (2)$$

где $T_1(x, y, z, \omega), T_2(x, y, z, \omega)$ и $T_3(x, y, z, \omega)$ — нестационарные распределения температуры в первой области полупроводника, припое и третьей области полупроводника соответственно; K_1, K_2 — теплопроводности полупроводникового материала и припоя; l — толщина слоя припоя.

При определении ФД-сигнала эффекты воздействия тепловой линзы вдоль направления распространения пучка зондирующего лазера суммируются [5—7]. На рис. 1 это направление совпадает с осью Y, перпендикулярной к плоскости рисунка. При регистрации ФД-сигнала по отклонению пучка зондирующего лазера тепловой линзой в направлении, перпендикулярном к поверхности образца, он пропорционален усредненному по y градиенту температуры воздуха. Поэтому, если для температуры газовой среды ввести обозначение $T_g(x, y, z, \omega)$, то ФД-сигнал оказывается пропорциональным градиенту $\partial \overline{T}_g(x, z, \omega)/\partial z$ (здесь введено обозначение

$$\overline{T}_{\mathrm{g}}\left(x,z,\omega\right) = \int_{-\infty} \mathrm{d}y T_{\mathrm{g}}\left(x,y,z,\omega\right)$$
). В силу равенства тем-

ператур на границе раздела образца и воздушной среды, например, в зоне расположения его полупроводниковой области справедливо соотношение $T_g(x,y,z,\omega)\Big|_{z=0} = T_1(x,y,z,\omega)\Big|_{z=0}$. Последнее равенство позволяет найти ФД-сигнал от области 1 с помощью

выражения
$$\overline{T}_{g}(x,z,\omega) = \overline{T}_{1}(x,z=0,\omega) \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\kappa_{g}}}z\right)$$
 (где

κ_g — температуропроводность воздуха) при условии, что известно распределение температуры на поверхности образца.

Приведенные соображения по определению $\Phi Д$ -сигнала позволяют свести рассматриваемую задачу для гармонической тепловой волны к двухмерному случаю. Методика решения подобных двухмерных задач при контакте двух материалов была предложена в работах [9, 10]. При этом определяют Фурье-компоненты температур $\tilde{T}_j(x,y,k_z,\omega) = \int dz e^{ik_z z} T_j(x,y,z,\omega)$. Ниже результаты работ [9, 10] были обобщены на случай наличия промежуточного слоя между двумя контактирующими областями (слоя припоя). Сами распределения температур $T_j(x, y, z, \omega)$ и $\Phi Д$ -сигнал восстанавливали по Фурье-образам соответствующих температур численными методами с помощью быстрого преобразования Фурье.

Результаты и их обсуждение

Экспериментально процессы теплопереноса в диодных столбах исследовали путем перемещения образца вдоль координаты x (см. рис. 1) при фиксированном положении пучков лазеров накачки и



Рис. 2. Характер изменения амплитуды ФД–сигнала при перемещении зоны возбуждения тепловых волн вдоль поверхности диодного ключа:

– спайка шлифованных кремниевых поверхностей; б спайка полированных поверхностей.

Частота тепловых волн 1 кГц. Не заштрихованные участки соответствуют областям кремния, заштрихованные — зонам припоя

считывания. При этом изменялось расстояние между центром возбуждения тепловых волн на поверхности образца и расположением зоны спайки. Изменение характера теплоотвода от образца регистрировали по соответствующему изменению ФД-сигнала. На рис. 2 приведены результаты подобных экспериментов для образцов первой группы, собранных пайкой. Из рис. 2 видно, что ФД-сигнал по мере приближения к зоне спайки заметно увеличивается, причем это увеличение проявляется значительно сильнее для диодных столбов из «шлифованных» пластин. Подобное поведение ФД-сигнала указывает на разное качество теплоотвода из полупроводниковых структур с различной обработкой их поверхностей: существенно худший теплоотвод имеют пластины в диодных столбах со шлифованными поверхностями пластин по сравнению с полированными.

На рис. 3 приведены результаты более детального исследования характера изменения ФД-сигнала в диодных столбах по мере приближения области возбуждения тепловых волн в кремнии к границе зоны спайки. На рис. 3 приведены также результаты теоретических расчетов характера изменения ФДсигнала по изложенной методике по мере изменения расстояния между центром пучка возбуждающего лазера и зоной спайки. В расчетах теплопроводность кремния принимали равной 1,5 Вт/(см · °С). Толщину областей спайки в структурах со шлифованными поверхностями находили в диапазоне 35-40 мкм, а с полированными поверхностями 15-20 мкм. Их толщину определяли оптическим методом. Единственным параметром, варьировавшимся в ходе расчетов, являлась теплопроводность слоя спая. При этом наилучшего совпадения экспериментальных и теоретических результатов для ФД-сигналов при спайке шлифованных поверхностей достигали при эффективном значении коэффициента теплопроводности





- спайка шлифованных кремниевых поверхностей;

б — спайка полированных поверхностей.

▲ — эксперимент; сплошные линии — расчет, соответствующий значениям K_2 : $a - K_2 = 0,20$ Вт/(см °С); $b - K_2 = 0,20$ = 0,38 Bт/(см · °С); штриховые линии — расчет, соответствующий объемному значению коэффициента теплопроводности припоя ПОС 63. Частота тепловых волн 1 кГц



Рис. 4. Поведение амплитуды ФД–сигнала от полупроводниковой области вблизи границы зоны диффузионной сварки под давлением 10⁵ кПа

слоя спайки 0,20 Вт/(см · °С), а полированных — при 0,38 Вт/(см · °С). Эти значения оказались несколько меньше объемного коэффициента теплопроводности припоя ПОС 63, составляющего 0,48 Вт/(см · °С), что можно объяснить сильным влиянием интерфейсов металл—полупроводник на общую теплопроводность спая при малых толщинах слоя припоя.

Из полученных результатов видно, что наилучшие теплофизические свойства контактов между отдельными элементами ключей для приборов первой группы могут быть достигнуты при спайке полированных полупроводниковых поверхностей. Однако даже в этом случае припой ПОС 63 при реальных толщинах контактов не обеспечивает идеальных теплофизических характеристик.

Что касается столбов из второй группы образцов, то для них практически не наблюдали какого-либо увеличения ФД-сигнала по мере приближения к зоне соединения полупроводниковых пластин через слои алюминия (рис. 4). Подобное поведение свидетельствует о практически идеальном характере теплоотвода через такие контакты. Вместе с тем в соответствии с полученными в работе результатами этот вывод можно считать справедливым только для частот порядка 1 кГц. При более высоких частотах необходимо дополнительное исследование.

Заключение

Показано, что лазерные термоволновые методы обладают достаточно высокой чувствительностью к характеру динамических процессов теплоотвода в многоэлементных импульсных силовых приборах. Они позволяют качественно и количественно оценивать динамические теплоотводящие свойства контактов в таких приборах, изготовленных с применением различных технологий сборки. В связи с этим они могут быть использованы для решения задач по оптимизации теплофизических свойств мощных импульсных силовых приборов.

Библиографический список

1. **Baliga, B. J.** Fundamentals of power semiconductor devices / B. J. Baliga. – N.–Y.: Springer Sci., 2008. – 1072 p.

2. Efanov, V. M. Powerful semiconductor 80 kV nanosecond pulser / V. M. Efanov, A. F. Kardo–Sysoev, M. A. Larionov, I.G. Tchashnikov, P. M. Yarin, A. V. Kriklenko // Proc. of the 11–th. IEEE Int. Pulsed Power Conf. – Maryland (USA), 1997. – V. 2. – P. 985–987.

3. Любутин, С. К. Высокочастотные импульсные генераторы на основе SOS-диодов с субнаносекундным временем обрыва тока / С. К. Любутин, С. Н. Рукин, Б. Г. Словиковский, С. Н. Цыранов. // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – Вып. 3. – С. 52—60.

4. **Kozlov, V. A.** New generation of drift step recovery diodes (DSRD) for subnanosecond switching and high repetition rate operation / V. A. Kozlov, I. A. Smirnova, S. A. Moryakova, A. F. Kardo–Sysoev. // Conf. Rec. of the 25–th. Int. Power Modulator Symp. – California (USA), 2002. – P. 441–444.

5. **Glazov, A. L.** Measurement of thermal parameters of solids by a modified photodeflection method / A. L. Glazov, K. L.Muratikov // Optical Eng. – 1997. – V. 36, N 2. – P. 358—362.

6. Глазов, А. Л. Определение теплофизических характеристик и параметров трещин в керамиках фотодефлекционным методом / А. Л. Глазов, К. Л. Муратиков // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, Вып. 6. – С. 110—115.

7. **Muratikov, K. L.** Photothermal and photoacoustic measurement of thermal and thermoelastic properties of ceramics with residual stresses / K. L. Muratikov, A. L. Glazov, D. N. Rose, J. E. Dumar // High temperatures – High pressures. – 2001. – V. 33, N 3. – P. 285—292.

8. Torn, R. D. A generalized model of photothermal radiometry / R. D. Torn, E. P. O'Hara // J. Appl. Physi. – 1982. – V. 53, N 8. – P. 5392—5400.

9. Shendeleva, M. L. Thermal wave reflection and refraction at a plane interface: Two-dimensional geometry / M. L. Shendeleva // Phys. Rev. B. -2002. - V. 65, N 13. - P. 134209-1—134209-8.

 Shendeleva, M. L. Instantaneous line heat source near a plane interface / M. L. Shendeleva // J. Appl. Phys. – 2004. – V. 95, N 5. – P. 2839—2845.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00664).

* *