

К. ф.-м. н. С. П. ПАВЛЮК, к. ф.-м. н. Л. В. ИЩУК,  
к. ф.-м. н. В. М. КИСЛИЦЫН

Украина, г. Киев, Киевский национальный университет  
им. Тараса Шевченко, Институт электросварки им. Е. О. Патона  
E-mail: pps@mail.univ.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
25.09 2003 г.  
Оппонент И. В. ПРОСТОВ  
(НПО "Интеграл", г. Минск)

## ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

*Для диагностики качества полупроводниковых диодов, изготавливаемых методом сварко-пайки, предлагается использовать изображение излучения кристалла.*

В последние годы получило развитие использование полупроводникового диодного кристалла в качестве нагревателя для разных технических целей. При изготовлении промышленных диодов средней мощности типа КД105—КД221 методом сварко-пайки [1] используется разогрев расплаиваемого полупроводникового кристалла протекающим током до температуры, превышающей температуру пайки.

Другим известным применением диодного кристалла является его использование в качестве нагревателя в микропаяльниках для пайки микроизделий [2].

Важным условием применимости диодного кристалла в качестве нагревателя является получение как можно более однородного его разогрева. Неоднородный разогрев кристалла может вызвать возникновение механических напряжений в нем и проявление эффектов [3], приводящих к деградации параметров кристалла и даже разрушению его.

Для оценки однородности разогрева можно использовать различные методы. Расчетные методы [например, 4] дают точную картину распределения тепловых полей в кристалле, но сложны для простой технологической оценки его качества. Предположения, которые упрощают эти методы, ограничивают круг применимости результатов расчетов. Достоверные данные о тепловом поле в кристалле можно получать, используя инфракрасные (ИК) радиометры [5], ИК-микроскопы [6] и тепловизоры [7]. Из перечисленного оборудования наиболее простым, но полностью пригодным для качественной оценки теплового поля, является ИК-микроскоп.

Целью представленной работы было исследование связи однородности разогрева диодного кристалла с ИК-излучением из него, а также апробация предлагаемого метода диагностики качества полупроводникового диода в процессе его изготовления.

Электрический ток, протекающий через полупроводниковый кристалл, вызывает одновременно два вида излучения — тепловое и рекомбинационное, возникающее из-за рекомбинации образующихся под действием тока неравновесных электронов и дырок.

При комнатной температуре интенсивность рекомбинационного излучения максимальна при длине волны 1,1 мкм. Величина интенсивности связана с концентрацией инжектированных носителей заряда и через нее — с плотностью разогревающего тока. Если ток распределен равномерно по сечению кристалла, то интенсивность излучения и разогрев образца не зависят от координаты, направленной вдоль  $p-n$ -перехода.

Таким образом, рекомбинационное излучение, как и тепловое, которое непосредственно отображает распределение температуры, может быть использовано для оперативного определения однородности разогрева кристалла, что позволяет судить о качестве изготовленного полупроводникового кристалла.

Для определения величины разогрева можно использовать тепловое излучение [8], но для этого необходимо отделять его от рекомбинационного. При качественной оценке однородности разогрева в этом нет необходимости.

Рекомбинационное и тепловое излучения в нашем случае существуют одновременно только во время протекания через кристалл электрического тока. После выключения тока они затухают с разной скоростью: рекомбинационное — за время жизни носителей заряда в полупроводнике ( $\tau$ ), тепловое — за время охлаждения кристалла. Измерения  $\tau$  методом, описанным в [4, с. 186—192], показали, что для исследуемых нами кристаллов  $\tau=60$  мкс. Время охлаждения кристалла составляло 30...80 мс. Такая большая разница (три порядка) во времени затухания позволяет отделить тепловое излучение от рекомбинационного.

Для исследования излучения использовались импульсный генератор разогревающего тока и ИК-микроскоп типа МИК-1. Примененный в МИК-1 электронно-оптический преобразователь регистрировал излучение с длиной волны 0,75...1,2 мкм. Для фиксации тепловых полей можно было использовать ПЗС-видеокамеру Sunkwang SK2002 с рабочим диапазоном длины волны 0,4—1,0 мкм, вмонтированную в один из окуляров микроскопа, и выводить изображение на экран компьютера.

В эксперименте разделение излучений было выполнено следующим образом. Между кристаллом и объективом микроскопа устанавливался специальный затвор с приводным механизмом. В момент времени  $t = t_{\text{имп}} + (4...8)\tau$  (где  $t_{\text{имп}}$  — время протекания импульса нагрева), после того как неравновесные носители заряда полностью рекомбинировали, затвор

открывали и регистрировали только тепловое излучение. (Разброс (4...8) $\mu$  связан с тем, что время срабатывания затвора было порядка 0,5 мс и разброс времени его срабатывания и времени включения механизма затвора не разрешал получить большую точность. В связи с этим не удалось получить фотографии теплового поля, которое возникало при нагревании кристалла коротким импульсом тока.)

Исследовались кремниевые кристаллы, используемые для изготовления диодов КД105, КД209. Базовый материал — кремний КЭФ40; *p*-область толщиной 0,1 мм легирована бором. Кристаллы имели цилиндрическую форму (диаметр — 1,8 мм, высота — 0,3 мм). Торцевые контакты кристалла металлизированы.

Разогрев диодов осуществлялся протекающим током в импульсном режиме. Импульсы разогревающего тока были двух видов. Короткий импульс длительностью 1,5 мс, применяемый для разогрева микропаяльника, получали разрядом емкости  $C = 3600$  мкФ через последовательно включенные кристалл и ключ (тиристор типа Т-50). Длинный импульс длительностью 100 мс, применяемый при сборке диодов методом сварки-пайки, получали разрядом емкости

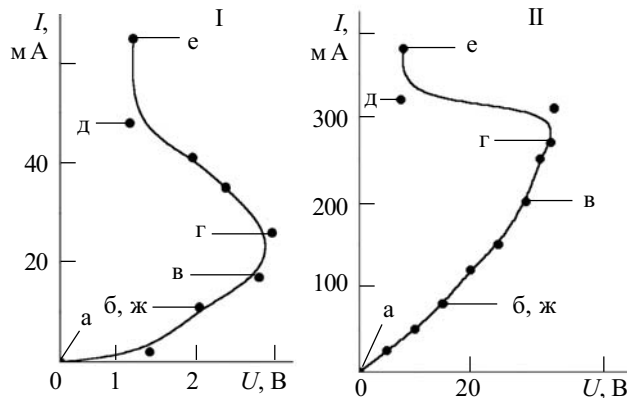


Рис. 1. ВАХ диода при разогреве его длинным (I) и коротким (II) импульсом тока

$C = 40000$  мкФ через последовательно включенные кристалл, ключ и сопротивление величиной 1 Ом.

Разная степень нагрева кристалла достигалась изменением амплитуды импульса тока  $I$ . При этом фиксировалось падение напряжения  $U$  на кристалле. На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) диода, полученные при его разогреве длинным и коротким импульсами тока. Для указанных

здесь точек на рис. 2 приведены изображения излучения кристалла, полученные без затвора. (По указанным выше причинам зафиксировать излучения с помощью видеокамеры в режиме питания диода короткими импульсами тока не удалось, поэтому они приведены в виде рисунков.)

На рис. 2, а приведены изображения исходного кристалла в ИК-свете при отсутствии тока. В области *p-n*-перехода видна темная полоса, слева от которой расположена *p*-область, справа — *n*-область.

При воздействии импульса тока малой амплитуды возникало излучение, которое было зафиксировано без применения затвора (см. рис. 2, б) и не наблюдалось при его использовании, что говорит об отсутствии тепловой составляющей излучения. Увеличение амплитуды приводило к уменьшению интенсивности излучения (рис. 2, в), которое и в этом случае не наблюдалось при использовании затвора.

Здесь, по сравнению с рис. 2, б, увеличилась рассеиваемая на кристалле мощность (а значит, и температура), что при уменьшении интенсивности излучения свидетельствует о наличии лишь рекомбинационной составляющей. Причиной такого ослабления интенсивности излучения, особенно в более высокоомной *n*-области кристалла, является джоулев разогрев кристаллической решетки кремния [9].

Дальнейшее увеличение амплитуды приводило к тому, что с поверхности перехода начинало исходить мощное однородное излучение (рис. 2, г). Отсутствие темной полоски в области *p-n*-перехода указывает на то, что регистрируется тепловое из-

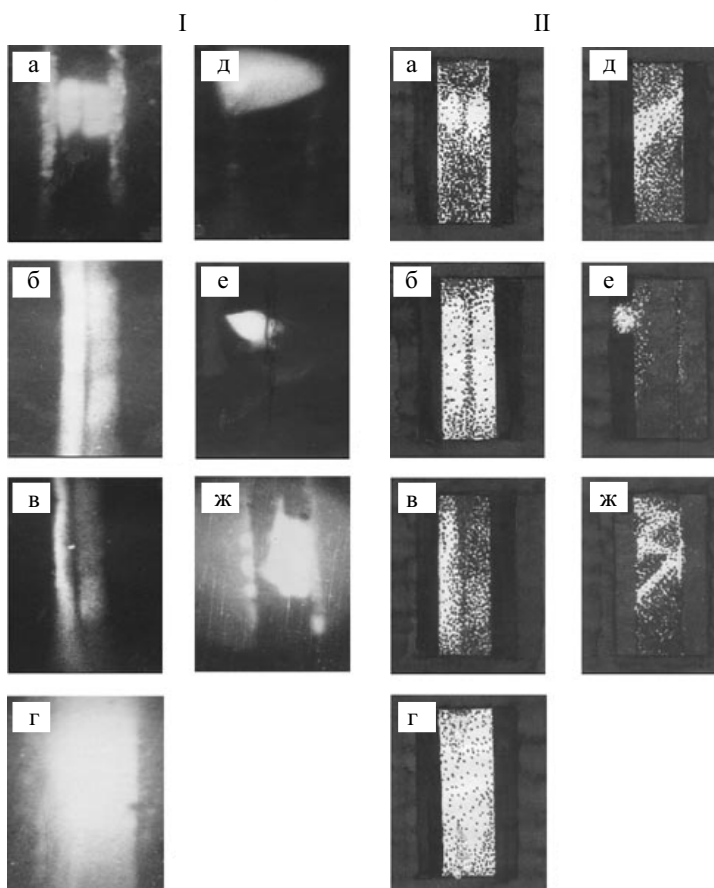


Рис. 2. Изображения излучения диодного кристалла при разогреве его длинным (I) и коротким (II) импульсом тока:

а — в ИК-свете; б — свечение, обусловленное рекомбинационным излучением; в — уменьшение интенсивности рекомбинационного излучения вследствие разогрева кристаллической решетки; г — свечение, обусловленное тепловым излучением; д — локализация теплового излучения (шнурование тока); е — пробой диода; ж, з — свечение, обусловленное рекомбинационным излучением некондиционной структуры, полученное в тех же условиях разогрева, что и б

лучение. Это подтверждается тем, что при использовании затвора характер регистрируемого излучения не изменялся.

При последующем увеличении тока излучение локализовалось (рис. 2, *д*) по причине локализации тока в узкой области *p-n*-перехода. Далее происходил пробой диода с выбросом материала (рис. 2, *е*). Эти наблюдения хорошо согласуются с ВАХ на рис. 1 — здесь видно, что в режимах *д* и *е*, когда напряжение снижалось, ток резко возрастал.

В задачу данного исследования не входило изучение физического механизма локализации тока через кристалл. Отметим только, что при довольно большом напряжении такая локализация тока должна иметь место даже в случае идеального в технологическом отношении полупроводникового кристалла. Действительно, как показано в [5], разогрев кристалла током приводит к появлению S-образной вольт-амперной характеристики. Из самых общих соображений [10, с. 103—125] следует, что в этом случае должно происходить образование шнура тока, возникновение которого облегчит неоднородность кристалла.

В работе [9] локализация излучения диодного кристалла, подобная описанной в этой статье, наблюдалась с помощью ИК-радиометра. После подачи 3—7 импульсов напряжения, вызывающих локализацию тока и излучение, кристалл выходил из строя.

Применение затвора в случаях (*з*—*е*) не приводило к изменению регистрируемой картины свечения.

Изображения излучения на рис. 2, *б*—*е* получены для кондиционного диода. На рис. 2, *ж* приведено свечение некондиционного диода при условиях слабого разогрева. Здесь видно, что излучение существенно неоднородно по сечению кристалла. Дальнейшее увеличение амплитуды протекающего тока приводило к пробое кристалла по линиям протекания тока подобно изображенному на рис. 2, *д*.

Отметим, что характер излучения кристалла при нагреве его коротким импульсом тока такой же, как и при разогреве длинным импульсом. При этом абсолютные значения *U* и *I* для этих двух режимов существенно различаются. Рассчитанные же по данным ВАХ значения рассеиваемой в кристалле энергии оказались практически одинаковыми в случаях длинного и короткого импульсов тока для каждой из наблюдавшихся (*б*—*ж*) картин излучения, что подтверждает предложенные объяснения характера излучения.

При проведении диагностики из партии диодных кристаллов выбиралось некоторое количество для подбора напряжения, при котором излучение аналогично приведенному на рис. 2, *б* (или *ж*). Такой подбор допустим, т. к. для одной партии диодных кристаллов разброс параметров невелик. Затем вся партия паялась при подобранном режиме с одновременным кон-

тролем изображения на экране дисплея. Это позволило сразу отбраковывать некондиционные диоды.

Для подтверждения правильности полученных результатов диагностики паянная партия диодов тестировалась по электрическим параметрам. Результаты совпали в 98% случаев.

\*\*\*

Таким образом, для экспресс-диагностики изготавливаемого полупроводникового диода можно использовать изображение рекомбинационного излучения, полученное в режиме слабого разогрева кристалла (рис. 2, *б*, *ж*). Такой режим делает метод диагностики шадящим, т. к. не приводит к перегреву диодного кристалла.

Экспериментальное изучение рекомбинационного и теплового излучения кремниевых кристаллов, которые используются для производства диодов КД105, показало, что можно подобрать такой режим, при котором происходит однородный разогрев кристалла при сварко-пайке.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. А. с. 395696 СССР. Способ сборки полупроводниковых приборов / А. А. Россошинский, В. А. Лебига, Э. А. Альперович, В. М. Кислицын.— 05.09.79.
2. Павлюк С. П., Кутлин Г. Н., Кислицын В. М., Россошинский А. А. Использование кремния в качестве нагревательных элементов микропаяльников // Автоматическая сварка.— 1999.— № 2.— С. 41—44.
3. Добровольский В. Н., Павлюк С. П. Термический градиентно-дрейфовый домен в электронно-дырочной плазме германия // ФТП.— 1981.— № 15.— С. 120—129.
4. Давыдов П. Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов.— М.: Энергия, 1967.
5. Бурцев Э. Ф., Грехов И. В., Крюков Н. Н. Локализация тока в диодных структурах при большой плотности прямого тока // ФТП.— 1970.— № 4.— С. 1955—1961.
6. Кудин В. Д. Применение ИК-термографического микроскопа для контроля теплового излучения мощных транзисторов // Опыт работы в электронной промышленности.— 1969.— № 3.— С. 72—84.
7. Гончаренко А. А., Дьяков Ю. Н., Штейнман Г. А. и др. Прибор для измерения теплового излучения интегральных схем // Электронная промышленность.— 1971.— № 2.— С. 44—47.
8. Ranhe M. J. Infrared as a thermal analysis // Solid State Technology.— 1970.— Vol. 13.— P. 67—72.
9. Бурцев Э. Ф., Грехов И. В., Крюков Н. Н., Сергеев В. Г. Исследование процесса включения *p-n-p*-структуры с помощью регистрации рекомбинационного излучения // ФТП.— 1969.— № 3.— С. 1638—1643.
10. Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П., Миронов А. Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках.— М.: Наука, 1972.

в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Полупроводниковый генераторный модуль с умножением частоты для аппаратуры КВЧ-терапии. В. А. Перфильев, С. В. Плаксин, С. И. Соколовский (Россия, г. Томск; Украина, г. Днепропетровск)
- Регенерирование ЭДТА из комплексных растворов тяжелых металлов. О. Гиллене, И. Айкайте, О. Нивинскене (Литва, г. Вильнюс)
- Термoeлектрические датчики для экспресс-диагностики. А. А. Ащеулов, Л. Я. Кушнерик (Украина, г. Черновцы)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции