

СТОЙКОСТЬ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ ИК-ДИАПАЗОНА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Градобоев, М.К. Скаков*, Е.В. Полицинский, Д.М. Аубакирова*

Юргинский технологический институт ТПУ

*Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: gradoboev1@mail.ru

Представлены результаты исследования стойкости серийных светоизлучающих диодов ИК-диапазона на основе эпитаксиальных слоев GaAs, легированных Si, к воздействию одиночных импульсов лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм и длительностью 100 нс, 10 мкс и 1 мс. Показано, что деградация мощности излучения диодов обусловлена проплавлением контакта металл-полупроводник, при этом их стойкость сильно зависит от направления воздействия лазерного излучения. Установлено несколько пороговых значений плотности мощности лазерного излучения: плотность мощности, ниже которой отсутствует деградация диодов, а выше которой наблюдается деградация диодов; плотность мощности, при которой наблюдается полное проплавление контакта металл-полупроводник и плотность мощности, при которой происходит механическое разрушение диодов по плоскости кристалл – кристаллодержатель. Показано, что диаграмма направленности излучения диодов позволяет определить пороговые значения плотности мощности лазерного излучения, падающего под углом к оптической оси диода. Установлено, что режим питания диода не влияет на установленные пороговые плотности мощности лазерного излучения.

Ключевые слова:

Импульсное лазерное излучение, светоизлучающие диоды, эпитаксиальные слои, GaAs, контакт металл-полупроводник.

Key words:

Pulse laser beam, light emitting diodes, epitaxial layers, GaAs, contact metal-semiconductor.

Введение

Широкое применение светоизлучающих диодов (СИД) ИК-диапазона в различных информационных системах и системах управления требует обеспечения их устойчивости к различным внешним воздействиям. При этом достаточно развито и применение лазерных систем с самым разнообразным назначением. В частности, лазерное излучение может быть использовано для исследования воздействия импульсного γ -излучения на различные полупроводники и полупроводниковые приборы [1, 2]. Оптическое излучение способно приводить как к сбоям в работе СИД и систем на их основе, так и к катастрофическим отказам СИД. Это обуславливает актуальность исследования механизмов воздействия как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения с различной длиной волны с целью определения стойкости СИД.

Лазерное излучение с длиной волны в окне прозрачности материала СИД способно генерировать электронно-дырочные пары, разделение которых во внешних и встроенных электрических полях приводит к появлению наведенного тока. При этом основное поглощение мощности лазерного излучения будет происходить на границе металлический омический контакт – полупроводник [3]. Именно такое импульсное лазерное излучение (далее ИЛИ) используется для моделирования воздействия импульсного γ -излучения на различные полупроводники и полупроводниковые приборы [1, 2]. С другой стороны, лазерное излучение с длиной волны вне окна прозрачности используемого полупроводникового материала приводит к деградации поверхности линзы СИД вследствие поглощения энергии в тонком приповерхностном слое [3, 4]. Таким образом, при

различной длине волны лазерного излучения могут проявляться различные механизмы деградации СИД.

Целью работы является исследование действия ИЛИ длительностью 100 нс, 10 мкс и 1 мс с длиной волны ($\lambda=1,06$ мкм) в окне прозрачности на серийные СИД ИК-диапазона.

Объекты и методы исследований, используемое оборудование

В качестве объектов исследования использовались серийные СИД ИК-диапазона АЛ107, изготовленные на основе эпитаксиальных слоев GaAs, полученных методом жидкофазной эпитаксии. В качестве подложки использовался монокристаллический GaAs, а легирование эпитаксиальных слоев осуществлялось кремнием. На рис. 1 показана конструкция исследуемых СИД и выбранные направления воздействия ИЛИ.

Линза СИД (рис. 1) предназначена для формирования заданной диаграммы направленности излучения активного элемента (кристалла). По законам геометрической оптики линза фокусирует воздействующее ИЛИ и направляет его на кристалл даже при боковом направлении действия ИЛИ. Из всех наиболее вероятных направлений воздействия ИЛИ достаточно исследовать направления, показанные на рис. 1, а эффективность действия ИЛИ при других направлениях можно определить, используя диаграмму направленности излучения СИД.

В данной работе использовались два режима электропитания СИД:

- активный – через диод пропускается прямой постоянный рабочий ток 100 мА (непрерывно потребляемая мощность 0,13...0,16 Вт);

- пассивный – внешние контакты СИД замкнуты, прямой ток отсутствует.

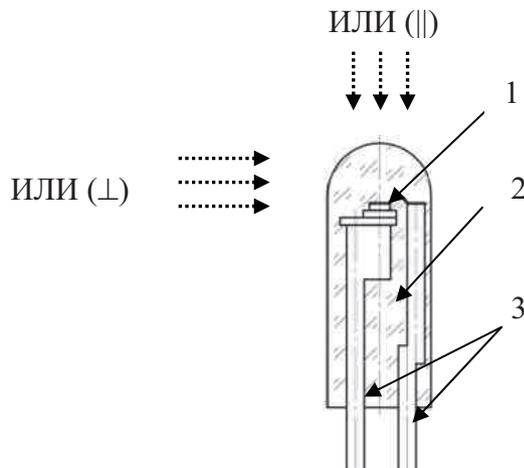


Рис. 1. Конструкция СИД и направления воздействия ИЛИ: 1) кристалл; 2) линза и корпус из оптического компаунда; 3) выводы питания. ИЛИ (⊥)/ИЛИ (∥) – излучение направлено перпендикулярно/параллельно оптической оси СИД

В активном режиме питания СИД к падающей энергии ИЛИ будет добавляться потребляемая СИД мощность в непрерывном режиме питания, а также дополнительная мощность, появление которой обусловлено протеканием наведенного тока, обусловленного разделением электронно-дырочных пар, генерируемых ИЛИ в объеме активного слоя СИД.

При пассивном режиме питания к падающей энергии ИЛИ добавится дополнительная мощность за счет протекания тока, обусловленного разделением электронно-дырочных пар, генерируемых ИЛИ, во встроенном электрическом поле (вблизи границы *p-n*-перехода).

Для каждого СИД до и после воздействия ИЛИ измеряли ватт-амперную, вольт-амперную и вольт-фарадную характеристики. Отметим, что мощность ИК-излучения СИД измеряли в шаре. Контроль диаграммы направленности и спектра излучения СИД осуществляли выборочно.

При проведении исследований использовались одиночные импульсы ИЛИ, при этом форма импульса была близка к нормальному закону. В табл. 1 представлены основные характеристики используемых лазеров.

Таблица 1. Характеристики используемых источников ИЛИ. Режим работы – одиночные импульсы. Длина волны излучения 1,06 мкм

№ установки	Длительность импульса	Плотность мощности, Вт/см ²
1	100 нс	2·10 ⁹
2	10 мкс	1·10 ⁷
3	1 мс	1·10 ⁶

Одиночный импульс ИЛИ характеризовали плотностью мощности ИЛИ W_p [1, 2]. Для опреде-

ления плотности мощности измеряли энергию излучения калориметром ИМО-2Н. Форму импульса и его длительность (по основанию) регистрировали запоминающим осциллографом, используя фотоприемник. Кроме того, для каждого эксперимента определялась площадь пучка ИЛИ. Используя измеренные значения, определяли плотность мощности расчетным путем. Требуемое изменение плотности мощности ИЛИ обеспечивали применением калиброванных фильтров, фокусирующих линз, а также изменением режима питания лазера. Во всех случаях площадь ИЛИ существенно превосходила площадь СИД, что позволило пренебречь краевыми эффектами, наблюдаемыми при фокусировке ИЛИ. Поскольку была обнаружена ярко выраженная зависимость стойкости СИД от направления ИЛИ, то особое внимание уделяли соблюдению строгой направленности воздействия ИЛИ.

Все эксперименты проводились при атмосферном давлении и комнатной температуре, а в качестве окружающей среды выступал атмосферный воздух.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 показано изменение нормированной мощности излучения СИД P/P_0 при воздействии ИЛИ различной длительности и различного направления воздействия. В данном случае, также как и далее, нормирование производилось на значение мощности излучения СИД P_0 до воздействия ИЛИ. Из рис. 2 видно, что в диапазоне используемых длительностей ИЛИ практически отсутствует влияние режима питания СИД на их стойкость.

В результате исследований выявлено три характерных плотности мощности ИЛИ для каждой длительности и выбранных направлений, которые показаны на рис. 2 стрелками и отмечены цифрами 1, 2 и 3, соответственно. Полученные результаты также суммированы в табл. 2.

Таблица 2. Пороговые плотности мощности ИЛИ

Направление действия ИЛИ	Длительность ИЛИ	Пороговая плотность мощности, Вт/см ²		
		$W_{пор1}$	$W_{пор2}$	$W_{пор3}$
∥	100 нс	0,5·10 ⁷	1,1·10 ⁷	3,6·10 ⁷
	10 мкс	7,2·10 ⁴	1,6·10 ⁵	5,0·10 ⁵
	1 мс	8,0·10 ³	2,0·10 ⁴	8,6·10 ⁴
⊥	100 нс	2,7·10 ⁷	6,0·10 ⁷	2,0·10 ⁸
	10 мкс	4,1·10 ⁵	9,0·10 ⁵	3,0·10 ⁶
	1 мс	4,3·10 ⁴	1,1·10 ⁵	4,7·10 ⁵

Рассмотрим более подробно выявленные пороговые значения плотности мощности ИЛИ. Если $W_p \leq W_{пор1}$, деградация мощности излучения СИД в результате однократного действия ИЛИ отсутствует. Но при этом воздействие нескольких последовательных импульсов ИЛИ с плотностью мощности незначительно меньше $W_{пор1}$ приводит к появлению деградационных процессов. При таком многократном воздействии СИД в пассивном режиме питания имеют более высокую стойкость.

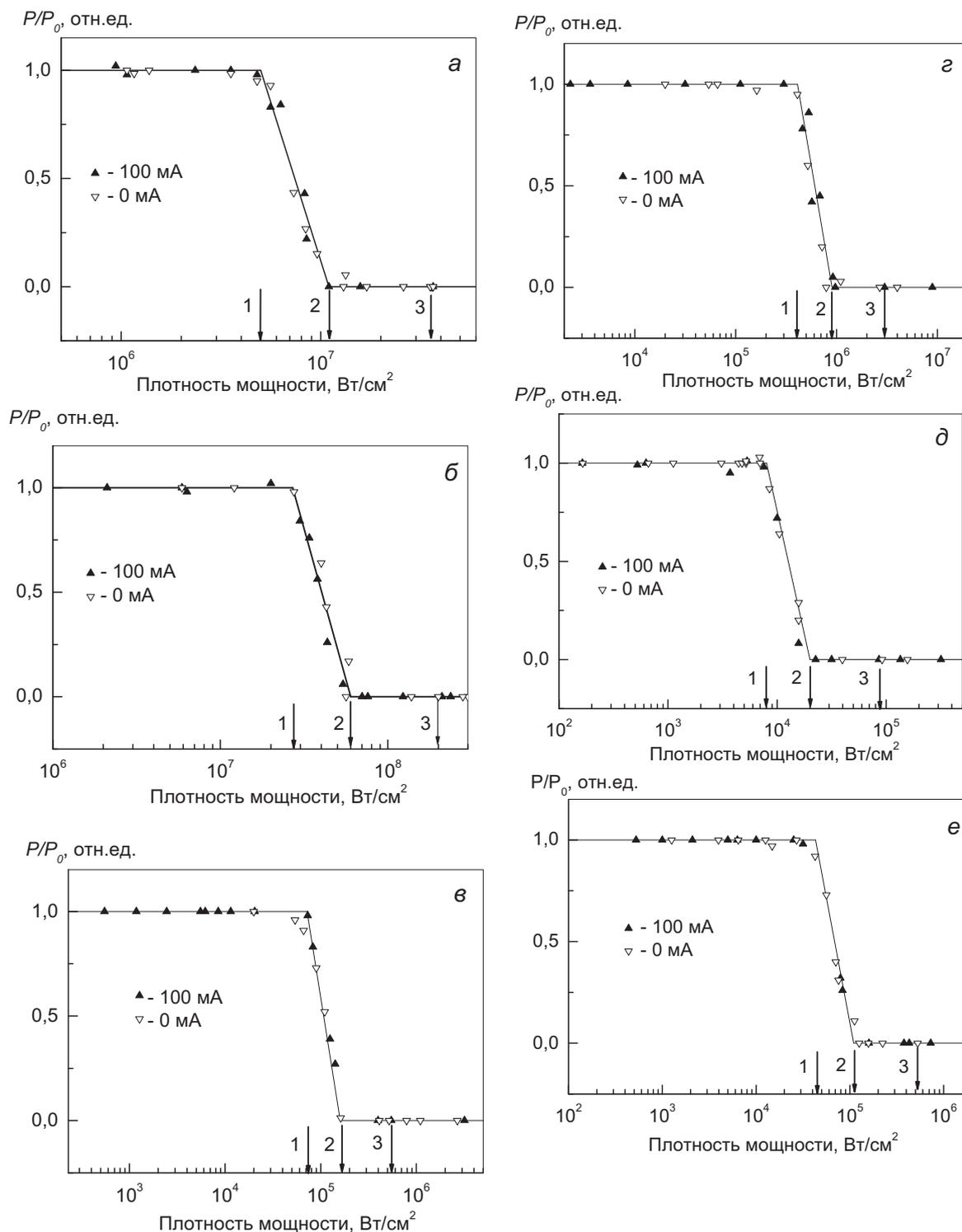


Рис. 2. Дegradация мощности излучения СИД при различных режимах питания в результате действия ИЛИ различной длительности: а) ИЛИ (||) 100 нс; б) ИЛИ (⊥) 100 нс; в) ИЛИ (||) 10 мкс; г) ИЛИ (⊥) 10 мкс; д) ИЛИ (||) 1 мс; е) ИЛИ (⊥) 1 мс

Это, скорее всего, обусловлено тем, что при активном режиме питания температура границы металл-полупроводник примерно на 10 К превышает комнатную температуру.

Если $W_{\text{пор1}} \leq W_i \leq W_{\text{пор2}}$, то наблюдается деградация мощности излучения СИД в результате повреждения границы металл-полупроводник. О на-

личии данного механизма деградации свидетельствует тот факт, что обнаруживается соответствующий сдвиг прямой ветви вольт-амперной характеристики в область более высоких напряжений, при этом величина сдвига тем больше, чем больше уровень воздействия. Вольт-фарадная характеристика остается без изменений, также как и обратная ветвь

вольт-амперной характеристики. Изменений в спектре излучения также нет. Таким образом, можно сделать вывод о том, что электрофизические и геометрические параметры р-п-перехода в результате такого воздействия остаются без изменений, а наблюдается только деградация контакта металл-полупроводник, где и происходит поглощение мощности падающего ИЛИ.

Исследование работы данных СИД при различных температурах показали, что деградация омического контакта наблюдается после воздействия температуры ≈ 410 К. Тогда можно считать, что при $W_p = W_{p1}$ температура границы металл-полупроводник соответствует этой температуре.

При $W_p \geq W_{p2}$ наблюдается катастрофический отказ СИД вследствие проплавления омического контакта. В данном случае СИД в активном режиме питания показывают короткое замыкание после воздействия ИЛИ. Для СИД, которые были в пассивном режиме питания при воздействии ИЛИ, наложение прямого напряжения при последующих замерах приводит к короткому замыканию и спаду мощности излучения до 0. Следует отметить, что температура плавления омического контакта составляет 625 К. Тогда можно предполагать, что при $W_p = W_{p2}$, температура границы металл-полупроводник составляет 625 К.

При $W_p \geq W_{p3}$ наблюдается механическое разрушение СИД в результате действия ИЛИ. При этом скол корпуса СИД из оптического компаунда происходит по плоскости между кристаллом и кристаллодержателем (см. рис. 1). Такое механическое разрушение можно объяснить следствием формирования больших механических напряжений, обусловленных высоким градиентом температуры на границе кристалл – кристаллодержатель.

Следует отметить, что значение W_{p2} , полученное нами при длительности ИЛИ 100 нс достаточно хорошо согласуется с известными данными. В [5] исследовали формирование омических контактов на основе слоев GaAs, имплантированных Te, путем воздействия ИЛИ длительностью 125 нс, $\lambda = 1,06$ мкм. В результате исследований было установлено, что порог разрушения контакта металл – n-GaAs составляет $1,2 \cdot 10^7$ Вт/см², что очень хорошо согласуется с полученными результатами для W_{p1} (рис. 2 и табл. 1).

При этом в [5] также установили, что при $W_p \geq 4 \cdot 10^7$ Вт/см² наблюдается сильное повреждение поверхности GaAs. Это значение плотности мощности достаточно хорошо согласуется с величиной W_{p3} (рис. 2 и табл. 1). С другой стороны известно, что сильное разложение GaAs наблюдается при температурах более 900 К [6] и сопровождается выделением газовой фазы в виде паров As и обогащением приповерхностных слоев Ga, вплоть до формирования отдельной металлической фазы, т. е. нарушением стехиометрического состава приповерхностных слоев вследствие разложения GaAs. Появление газовой фазы вблизи поверхности кристалла СИД на границе металл-полупроводник в

совокупности с наличием достаточно больших температурных градиентов вполне может приводить к механическому разрушению при $W_p \geq W_{p3}$, которое мы и наблюдали. Представленные результаты позволяют предполагать, что в данном случае температура границы металл-полупроводник составляет порядка 900 К.

Таким образом, полученные результаты позволяют построить изменение температуры границы металл-полупроводник в зависимости от плотности мощности ИЛИ при различных длительностях воздействующего импульса. На рис. 3 показана полученная зависимость температуры границы металл-полупроводник от плотности мощности ИЛИ (||). Некоторое изменение характера данной зависимости при длительности ИЛИ 1 мс возможно обусловлено отводом тепла от границы металл-полупроводник, которое практически не сказывается при меньших длительностях.

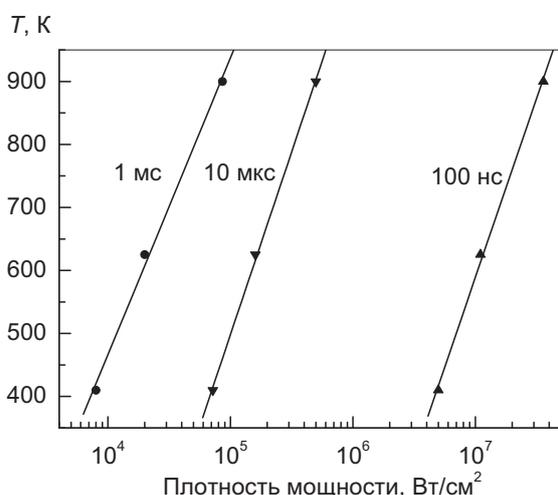


Рис. 3. Температура границы металл – полупроводник при различных длительностях ИЛИ (||)

Далее рассмотрим, каким образом пороговые плотности мощности зависят от направления воздействия ИЛИ. Для СИД была измерена диаграмма направленности мощности излучения, которая практически не изменяется в результате действия ИЛИ. Используя диаграмму направленности, мы рассчитали изменение пороговой плотности мощности в зависимости от направления ИЛИ, которое определялось углом α (α – угол между оптической осью СИД и направлением падения ИЛИ). На рис. 4 показана зависимость пороговой плотности мощности ИЛИ от угла падения α . Здесь в дополнение к данным табл. 1 использованы результаты исследований при $\alpha = 60^\circ$ и длительности ИЛИ 1 мс. Видно, что использование диаграммы направленности излучения СИД позволяет с достаточно высокой достоверностью оценить изменение пороговой плотности мощности при любом направлении воздействия, если эта величина известна для какого-то одного направления.

Рассмотрим изменение пороговой плотности мощности в зависимости от длительности ИЛИ. На рис. 5 представлена зависимость W_{p2} от дли-

тельности ИЛИ (\parallel). Для других пороговых плотностей мощности и других направлений ИЛИ были получены подобные результаты.

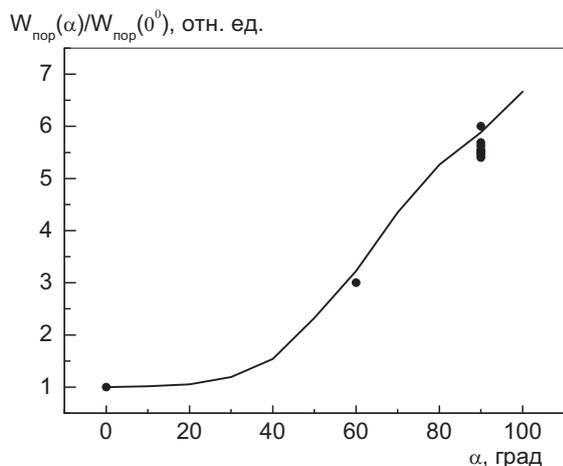


Рис. 4. Зависимость пороговой плотности мощности ИЛИ от угла падения: символы – эксперимент; линии – расчет

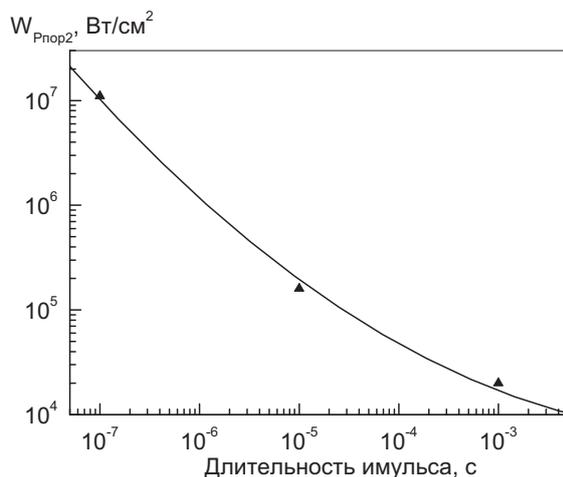


Рис. 5. Изменение пороговой плотности мощности $W_{пор2}$ в зависимости от длительности ИЛИ (\parallel)

Из рис. 3 и 5 видно, что с ростом длительности импульса ИЛИ пороговые плотности мощности снижаются. Возможно, это обусловлено тем, что с ростом длительности воздействующего ИЛИ происходит более сильный нагрев СИД непосред-

ственно в процессе действия импульса, а это, в итоге, приводит к снижению порогов развития деградиционных процессов, рассмотренных выше.

Заключение

1. Деградация мощности излучения светоизлучающих диодов при воздействии на них импульсного лазерного излучения с длиной волны в окне прозрачности материала активного элемента обусловлена проплавлением контакта металл-полупроводник.
2. При высоких плотностях мощности наблюдается механическое разрушение диодов по плоскости кристалл – кристаллодержатель вследствие разложения GaAs вблизи границы металл-полупроводник.
3. Установлены пороговые значения плотности мощности лазерного излучения, при которых отсутствует или наблюдается деградация диодов, происходит полное проплавление контакта металл-полупроводник и механическое разрушение диодов по плоскости кристалл – кристаллодержатель.
4. Выполнены оценки температуры границы металл-полупроводник при пороговых значениях плотности мощности лазерного излучения.
5. Показано, что диаграмма направленности излучения диодов позволяет определить пороговые значения плотности мощности лазерного излучения, падающего под любым углом к оптической оси диода, если известны пороговые плотности мощности для одного из направлений.
6. Установлено, что режим питания диода не влияет на установленные пороговые плотности мощности при данных длительностях лазерного излучения, но проявляется при многократном воздействии импульсного лазерного излучения.

В дальнейшем будут представлены результаты исследований переходных процессов в светоизлучающих диодах, обусловленных действием импульсного лазерного излучения с длиной волны в окне прозрачности используемого материала.

Работа выполнена в рамках Договора о сотрудничестве в области подготовки высококвалифицированных специалистов между ТПУ и ВКГТУ им. Д. Серикбаева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аствацатурьян Е.Р., Ахабаев Б.А., Скоробогатов П.К. Моделирование переходных ионизационных эффектов в ИМС лазерными методами // Зарубежная электронная техника. – 1988. – Т. 6 (325). – С. 34–75.
2. Пат. 2112990 РФ. МПК⁶ G01R 31/26. Установка для испытаний на радиационную стойкость / С.В. Ермолаев, Д.В. Громов, А.Ю. Никифоров, П.К. Скоробогатов, А.И. Чумаков. Заявлено 02.07.1996; Опубл. 10.06.1998.
3. Градобоев А.В. Действие импульсного лазерного излучения на светоизлучающие диоды // Радиационная физика: Труды Междунар. научной конф. (Бишкек – Каракол, 20–27 июля 2003 г.). – Бишкек: Илим, 2003. – С. 105.
4. Винценц В.С., Зайцева А.В., Зайцев В.Б., Плотников Г.С. Генезис наноразмерных дефектов и разрушений в GaAs при многократном квазистатическом фотодеформировании микронных областей полупроводника // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – № 3. – С. 257–264.
5. Barnes P.A., Leamy H.J., Poate J.M., Ferris S.D. Ohmic contacts produced by laser-annealing Te-implanted GaAs // Appl. Phys. Lett. – 1978. – V. 33. – № 11. – P. 965–967.
6. Градобоев А.В., Федоров А.И. Деградация арсенида галлия при воздействии эксимерного лазера // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70. – № 10. – С. 40–44.

Поступила 28.12.2009 г.