

# Фотоэлектроника

УДК 535.211

## Действие мощного импульса лазерного излучения на германиевый лавинный фотодиод

Г. М. Зверев, М. М. Землянов, А. А. Короннов

*Определено значение плотности мощности лазерного излучения, превышение над которым приводит к разрушению поверхности чувствительной площадки германиевого лавинного фотодиода. Исследован характер увеличения темнового тока от мощности лазерного воздействия для фотодиодов с различной глубиной залегания  $p-n$ -перехода. Показана повышенная стойкость к лазерному излучению фотодиодов с глубоким  $p-n$ -переходом.*

PACS 85.60.Dw

*Ключевые слова:* германиевый лавинный фотодиод, лазерный нагрев, темновой ток.

### Введение

Повышение стойкости фотоприемного устройства (ФПУ) к мощной импульсной лазерной засветке является актуальной задачей, поскольку одной из распространенных причин выхода из строя ФПУ, работающего в составе дальномера, является полная или частичная деградация фотодиода вследствие случайной засветки чувствительной площадки мощным лазерным излучением, отраженным от близко расположенных объектов.

В фотоприемных устройствах, предназначенных для работы на длине волны 1,064 мкм, широкое применение получили германиевые лавинные фотодиоды, которые наряду с фотодиодами на основе соединения  $A_3B_5$  позволяют обеспечить высокую чувствительность ФПУ. Однако, в отличие от фотодиодов на основе соединения  $A_3B_5$ , для которых известно значение пороговой плотности мощности [1], стойкость германиевых лавинных фотодиодов (ЛФД) к мощному лазерному воздействию на сегодняшний день изучена недостаточно.

В настоящей работе исследовались германиевые ЛФД с диаметром чувствительной площадки 100 мкм. Фотодиоды были выполнены по мезапланарной технологии на основе эпитаксиальной структуры  $p^+ - p - n^+$ , типа ЭГС-39-2.

### Постановка экспериментов

Исследование изменения фотоэлектрических параметров ЛФД в результате мощной лазерной засветки проводилось для случая локального воздействия сфокусированного излучения на чувствительную площадку. Такой подход позволил проводить серию воздействий на одном образце, поскольку диаметр сфокусированного излучения значительно меньше диаметра чувствительной площадки. В качестве источника лазерного излучения с длиной волны 1,064 мкм использовался лазер модели LCS-DTL-122QT. Воздействие проводилось в моноимпульсном режиме работы лазера при длительности оптических импульсов 4 нс.

### Теоретические оценки

Рассматривая действие мощного излучения на полупроводниковую структуру, можно выделить два случая. В первом случае уровень интенсивности воздействия не приводит к разрушению поверхности, однако возможно изменение фотоэлектрических параметров ЛФД. Во втором случае воздействие приводит к разрушению поверхности и изменению фотоэлектрических параметров ЛФД в подверженной засветке области.

Граница между первым и вторым случаем определяется уровнем интенсивности воздействия, превышение которого приводит к нагреву материала до температуры испарения.

Определение порогового уровня интенсивности, приводящего к разрушению поверхности, было проведено на основании решения уравнения теплопроводности и экспериментальных результатов.

Уравнение теплопроводности для случая лазерного нагрева материала запишется следующим образом [2, 3]:

**Зверев Георгий Митрофанович**, профессор, начальник отдела.

**Землянов Михаил Михайлович**, начальник отдела.

**Короннов Алексей Алексеевич**, инженер-конструктор.  
ОАО «НИИ «ПОЛЮС» им. М. Ф. Стельмаха».

Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3.

Тел. 8 (925) 276-14-86. E-mail: kornonov@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2015 г.

© Зверев Г. М., Землянов М. М., Короннов А. А., 2015

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{c(T) \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} + \frac{1}{c(T) \cdot \rho} \cdot \frac{P(t)}{S} \cdot (1-R) \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha \cdot z).$$

Температурные зависимости удельной теплоемкости  $c$  и коэффициента теплопроводности  $\lambda$  были получены на основании данных, представленных в [4], и аппроксимированы выражениями:

$$c(T) = 0,08 \cdot T + 297,095$$

$$\lambda(T) = 250,279 \cdot \exp(-5,772 \cdot 10^{-3} \cdot T) + 17,475.$$

Плотность германия  $\rho$  принималась равной  $5323 \text{ кг/м}^3$  [4].  $R$  — коэффициент отражения поверхности, который был принят для расчета равным  $0,1$ , что в реальном фотодиоде обеспечивается применением просветляющего покрытия  $\text{SiO}_2$  толщиной  $0,18 \text{ мкм}$ . Коэффициент поглощения излучения  $\alpha$  в Ge на длине волны  $1,064 \text{ мкм}$  определялся из графика [5] и составил  $2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ .

Для расчета площади засветки  $S$  использовался радиус пучка, измеренный в фокальной плоскости фокусирующего объектива. Измерение проводилось с помощью ПЗС-матрицы, на которую переносилось увеличенное изображение сфокусированного пучка, отраженного от отполированной поверхности торца оптоволокна, который был установлен в фокальной плоскости фокусирующего объектива вместо исследуемых ЛФД. В результате обработки полученных изображений было получено, что радиус пучка по уровню  $1/e$  составил  $5 \text{ мкм}$ , что находится в хорошем соответствии с теоретически рассчитанным значением  $4,5 \text{ мкм}$ .

Решение уравнения теплопроводности искалось численным методом для случая отсутствия теплообмена кристалла с окружающей средой, что выражается граничными условиями:

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial T(\infty,t)}{\partial z} = 0.$$

В результате было получено (см. рис. 1), что воздействие с плотностью мощности  $1,18 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$ , обеспечиваемое колоколообразным оптическим импульсом длительностью  $4 \text{ нс}$  и пиковой мощностью  $P = 92,7 \text{ Вт}$ , приводит к нагреву поверхности чувствительной площадки ЛФД до температуры  $3120 \text{ К}$ , начиная с которой становится возможным процесс испарения германия [4].

## Эксперименты и их результаты

Экспериментальное определение уровня интенсивности воздействия, приводящего к разрушению поверхности, проводилось в широком диапазоне мощностей на 11 образцах. После каждого воздействия записывалось изображение чувствительной площадки ЛФД, которое сравнивалось с изображением, полученным до воздействия. Такой подход позволил обнаружить на поверхности ЛФД лазерно-индуцированные дефекты с минимально возможными размерами, доступными для визуального наблюдения.

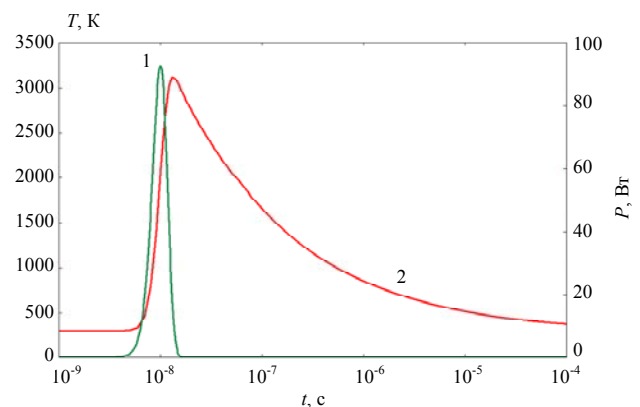


Рис. 1. Локальный лазерный нагрев поверхности чувствительной площадки фотодиода: 1 — лазерный импульс; 2 — температура поверхности

Форма и длительность воздействующего импульса контролировалась с помощью специального фотоприемного устройства, а плотность мощности лазерного излучения рассчитывалась исходя из распределения интенсивности в пучке.

В результате проведенного экспериментального исследования для рассмотренных ЛФД было установлено, что лазерное воздействие, начиная с некоторого порогового уровня интенсивности, приводит к деградации фотодиода, сопровождаемой образованием визуально наблюдаемого дефекта. При этом уровень мощности воздействия варьируется от образца к образцу и лежит в диапазоне от  $78$  до  $91 \text{ Вт}$ , что соответствует диапазону плотности мощности от  $0,99 \cdot 10^8$  до  $1,16 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$ .

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных позволяет заключить, что образование дефекта на чувствительной площадке в результате воздействия с плотностью мощности порядка  $10^8 \text{ Вт/см}^2$ , наиболее вероятно, вызвано испарением материала с поверхности.

С другой стороны, воздействие на ЛФД излучения с плотностью мощности ниже порогового уровня может приводить к увеличению темнового тока и к изменению коэффициента лавинного умножения.

Для выявления степени увеличения темнового тока при возрастании интенсивности излуче-

ния, была проведена серия воздействий на чувствительную площадку в диапазоне мощностей (10—90) Вт для нескольких фотодиодов.

Обратный ток фотодиода измерялся при нескольких значениях напряжения смещения непосредственно до и сразу после воздействия, поскольку, строго говоря, его значение зависит от температуры и влажности, которые могли меняться во время проведения продолжительного эксперимента. По измеренным значениям тока при обратных смещениях, обеспечивающих работу фотодиода в безлавином режиме, рассчитывалось среднее значение темного тока  $I_{cp}$ . У исследуемых образцов значение темного тока, измеренное перед первым воздействием, составило 96 и 86 нА для ЛФД № 234 и ЛФД № 172, соответственно.

Каждой мощности  $P$  ставилась в соответствие разностная величина  $\Delta I$  между средними значениями темного тока до и после воздействия. В результате была получена зависимость, представленная на рис. 2, из которой видно, что увеличение мощности воздействия приводит к увеличению темного тока ЛФД. Однако диапазон мощности, в котором начинается заметное увеличение тока, отличается от образца к образцу.

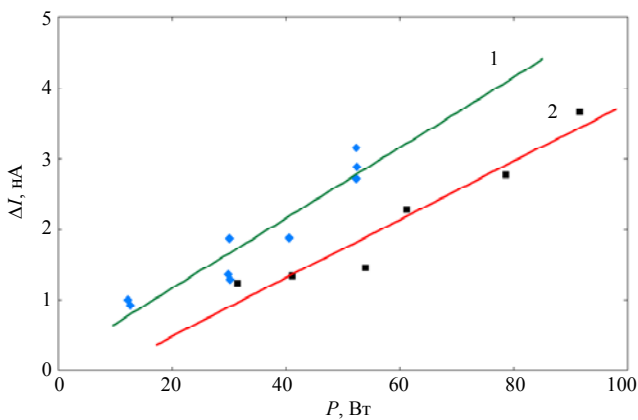


Рис. 2. Изменение темного тока  $\Delta I$ , вызванное воздействием лазерного излучения с мощностью  $P$ : 1 — ЛФД № 234, 2 — ЛФД № 172

Увеличение темного тока может зависеть не только от мощности излучения, но и от положения сфокусированного пучка на чувствительной площадке. Поэтому было проведено исследование действия лазерных импульсов одинаковой мощности в различных областях чувствительной площадки, и построена, представленная на рис. 3, зависимость значения увеличения темного тока от расстояния между центрами воздействующего пучка и чувствительной площадки.

Было обнаружено незначительное различие в значениях увеличении темного тока при условии попадания излучения на чувствительную

площадку, и его резкое увеличение при воздействии на мезу в пределах кольца (с внутренним и внешним радиусами 55 и 65 мкм, соответственно), где  $p$ - $n$ -переход выходит на поверхность ЛФД.

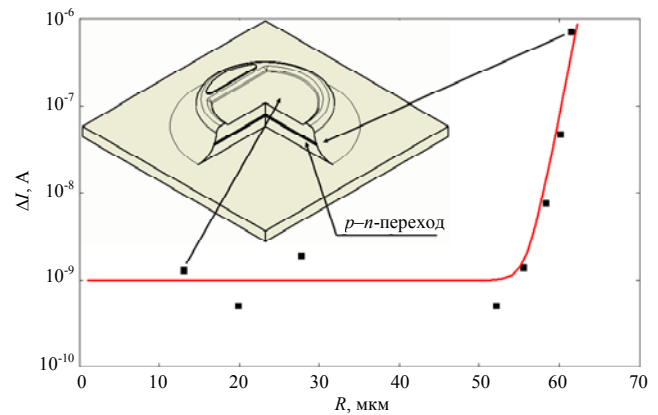


Рис. 3. Изменение темного тока  $\Delta I$  для ЛФД № 234 от расстояния  $R$  между центром чувствительной площадки и центром области воздействия. Стрелками указано соответствие между значением  $\Delta I$  и положением центра пучка

Такой характер увеличения тока указывает на то, что оно вызвано лазерным воздействием именно на  $p$ - $n$ -переход, и чем ближе к поверхности он расположен, тем меньший уровень мощности способен привести к увеличению темного тока.

Дальнейшее превышение интенсивности воздействия над пороговым уровнем приводит к образованию на поверхности ЛФД абляционных кратеров.

Как указывалось ранее, причиной увеличения темного тока является лазерное воздействие на  $p$ - $n$ -переход, и поэтому можно предположить, что лазерное воздействие на ЛФД с глубоким залеганием  $p$ - $n$ -перехода может привести к разрушению чувствительной площадки без заметного увеличения темного тока. Такой эффект был обнаружен на нескольких образцах при воздействии мощностью порядка 200 Вт. Последующие увеличение мощности воздействия до 400 Вт уже приводило к увеличению темного тока.

Измерения, проведенные в безлавином режиме работы ЛФД, показали, что отношение амплитуд фотосигналов в разрушенной и не разрушенной областях ( $U_{кратер}$  и  $U$ , соответственно) связано с коэффициентами отражения непросветленного германия и германия, покрытого  $SiO_2$  ( $R_{Ge}$  и  $R_{SiO_2-Ge}$ , соответственно) простым выражением:

$$\frac{U_{кратер}}{U} \approx \frac{1 - R_{Ge}}{1 - R_{SiO_2-Ge}}$$

Из этого соотношения видно, что меньшее значение амплитуды сигнала в разрушенной об-

ласти, по сравнению с сигналом в области, не подверженной лазерному воздействию, обусловлено разрушением просветляющего покрытия, а не самого  $p$ - $n$ -перехода.

### Воздействие на ЛФД расфокусированного лазерного пучка

Размещение ЛФД за пределами фокальной плоскости позволило сформировать на поверхности ЛФД пятно больших размеров. Воздействие на ЛФД лазерного пучка с радиусом 21 мкм по уровню интенсивности  $1/e$ , показало, что плотность мощности  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> еще не приводит к видимому разрушению поверхности, однако при плотности мощности  $1,28 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> на поверхности чувствительной площадки образуется дефект диаметром порядка 10 мкм. Сопоставление этих результатов с полученными для пучка радиусом 5 мкм, показывает, что увеличение размеров засвечиваемой области незначительно влияет на величину уровня интенсивности, приводящего к разрушению поверхности.

В то же время при увеличении размеров пучка растет площадь  $p$ - $n$ -перехода, подвергаемая лазерному воздействию, вследствие чего увеличение темнового тока может быть обнаружено при меньшей интенсивности излучения. Исследования, проведенные для двух образцов ЛФД, показали, что при увеличении радиуса воздействующего пучка с 5 и 21 мкм для увеличения темнового тока на 2—3 нА мощность воздействия должна быть увеличена с 78 до 435 Вт для одного образца и с 176 до 778 Вт для другого. Таким образом, при увеличении радиуса пучка в 4,2 раза значение плотности мощности воздействия, при которой возможно увеличение темнового тока, оказалось сниженным в 3,16 раза для первого образца, а для второго в 4 раза. Полученный результат позволяет проследить тенденцию снижения стойкости ЛФД при увеличении площади засветки, по которой допустимое значение плотности мощности оказывается обратно пропорциональным радиусу пучка.

### Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать выводы, что уровень плотности мощности воздействия  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> лазерного импульса с длительностью 4 нс и с гауссовым распределением интенсивности, сфокусированного в пятно по уровню  $1/e$  с радиусом 5 мкм, не приво-

дит к увеличению темнового тока и ухудшению чувствительности германиевого ЛФД с глубоким  $p$ - $n$ -переходом, который для эпитаксиальной структуры ЭГС-39-2 может лежать на глубине не более 6 мкм.

В случае залегания перехода на минимально допустимой для эпитаксиальной структуры глубине 2 мкм такой же уровень мощности воздействия оказывается достаточным для незначительного увеличения темнового тока.

Таким образом, воздействие на ЛФД пороговым уровнем плотности мощности позволяет по изменению его темнового тока дать оценку глубины залегания перехода и выбрать образцы с повышенной стойкостью к мощному воздействию. Такой предварительный анализ не приводит к значительному ухудшению параметров ЛФД, однако последующее применение исследованных и отобранных образцов в фотоприемных устройствах позволяет обеспечить им необходимый уровень чувствительности и стойкости к лазерному воздействию.

В ходе исследования ЛФД при воздействии на них пучка большого радиуса было обнаружено снижение их стойкости к мощной засветке, что объясняется увеличением площади  $p$ - $n$ -перехода, подверженной лазерному воздействию и увеличением ее вклада в общий темновой ток фотодиода.

*Авторы выражают благодарность коллективу отдела 661 НИИ «ПОЛЮС» за всестороннюю поддержку в проведении работы. Особенно Сафутин С. П. и Лозовой Н. Г. за предоставленные образцы ЛФД и Сафутину А. Е. за ценные советы при постановке экспериментов и обсуждении их результатов.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Dion B., Bélanger N., Lauzon J., et al. // Proc. SPIE. 2010. V. 7684-4. No. 704208. P. 31.
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967.
3. Головань Л. А., Кашкаров П. К., Лакеенков В. М. и др. // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. № 8. С. 931.
4. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1989.

## Influence of high-power monopulse laser irradiation on the germanium avalanche photodiode

G. M. Zverev, M. M. Zemlyanov, and A. A. Koronnov

M. F. Stelmakh Scientific Research Institute «Polus»  
3 Vvedensky str., Moscow, 117279, Russia  
E-mail: koronnov@inbox.ru

Received February 5, 2015

***On basis of numerical solution of thermal conductivity equation and experimental data, the threshold power density of laser influence was defined for germanium avalanche photodiode sensitive surface. For a photodiode with different depth of p–n-junction, the laser-induced dark current increment was investigated. The increased stability to laser radiation was demonstrated for the photodiode with deep junction.***

PACS 85.60.Dw

*Keywords:* germanium avalanche photodiode, laser heating, dark current.

### REFERENCES

1. B. Dion, N. Bélanger, J. Lauzon, et al., Proc. SPIE **7684-4** (704208), 31 (2010).
2. A. V. Lykov, *Theory of Heat Conduction* (Vyssh. Shkola, Moscow, 1967) [in Russian].
3. L. A. Golovan', P. K. Kashkarov, V. M. Lakeenkov, et al., Semiconductors **31**, 931 (1997).
4. A. P. Babichev, N. A. Babushkina, A. M. Bratkovsky, et al., *Physical Quantities. Handbook*. (Energoatomizdat. Moscow, 1991) [in Russian].
5. J. Gowar, *Optical Communication Systems* (Prentice/Hall International, London, 1986; Radio Svyaz', Moscow, 1989).