

Фотоэлектроника

УДК 535.211

Исследование характеристик германиевого лавинного фотодиода, подвергнутого мощному лазерному воздействию

А. А. Короннов, Г. М. Зверев, М. М. Землянов, Е. В. Жарикова, Д. В. Марсагишвили

Проведено исследование германиевых лавинных фотодиодов с диаметром чувствительной площадки 200 мкм, подвергнутых моноимпульсному воздействию сфокусированного лазерного излучения с длиной волны 1,064 мкм при длительности импульса 4 нс. Обнаружено, что в разрушенной области, возрастают коэффициент лавинного умножения и среднеквадратическое значение шума. Показано, что воздействие мощностью менее 700 Вт, при радиусе засвечиваемой области 11 мкм, не приводит к значительному ухудшению чувствительности фотоприемного устройства.

PACS: 85.60.Dw

Ключевые слова: германиевый лавинный фотодиод, воздействие лазерным излучением, коэффициент лавинного умножения, шум.

Введение

На сегодняшний день одной из актуальных задач в области высокочувствительных фотоприемных устройств (ФПУ) для импульсных лазерных дальномеров является обеспечение работоспособности ФПУ после мощной засветки. Поскольку стойкость фотоприемника к излучению с высокой интенсивностью определяется стойкостью применяемого в нем чувствительного элемента, то выбор фотодиода следует проводить с учетом этого параметра. Особый интерес представляют быстрореагирующие фотодиоды на базе германия и соединений A_3B_5 , применение которых позволяет реализовать необходимый уровень чувствительности фотоприемного устройства. Представленные в работе [1] результаты исследования германиевого лавинного фотодиода показывают, что при воздействии 4нс-импульса его стойкость на длине волны 1,064 мкм может достигать 10^8 Вт/см², в то время как для A_3B_5 фотодиодов это

значение при длительности импульса 4—20 нс лежит в диапазоне $1 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5$ Вт/см² [2—5]. Сравнение этих значений по энергетике показывает существенное преимущество германиевых лавинных фотодиодов (ЛФД). Это делает их наиболее перспективными для применения в высокочувствительных фотоприемных устройствах в целях обеспечения повышенной стойкости к мощной засветке.

Отметим, что исследование функциональных свойств фотодиодов, подвергавшихся лазерному воздействию, слабо освещено в литературе. В связи с этим, вопрос о продолжении эксплуатации фотоприемного устройства с частично деградировавшим фотодиодом остается открытым.

В данной работе представлены результаты исследования германиевого ЛФД, подвергнутого лазерному воздействию, и рассматривается возможность обеспечения ограниченной работоспособности ФПУ на его базе даже после разрушающего лазерного воздействия.

Постановка эксперимента

Исследуемые фотодиоды изготавливались по мезапланарной технологии из эпитаксиальной структуры p^+p-n^+ типа ЭГС-39-2, для которой типичное распределение концентрации легирующей примеси показано на рис. 1. Чувствительная площадка у фотодиодов была выполнена в форме чашечки диаметром 200 мкм в p^+ -слое. Травление p^+ -слоя проводилось на глубину 0,2—0,3 мкм для

Короннов Алексей Алексеевич, инженер-конструктор.
Зверев Георгий Митрофанович, профессор, начальник отдела.

Землянов Михаил Михайлович, начальник отдела.

Жарикова Елена Викторовна, инженер-технолог.

Марсагишвили Диана Вахтанговна, инженер-технолог.

ОАО «НИИ «ПОЛЮС» им. М. Ф. Стельмаха».

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

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

Статья поступила в редакцию 26 июня 2015 г.

© Короннов А. А., Зверев Г. М., Землянов М. М., Жарикова Е. В., Марсагишвили Д. В., 2015

снижения интенсивности рекомбинации в нем. Контактное кольцо, нанесенное по периметру чувствительной площадки, обеспечило равномерность напряжения смещения по площади p – n -перехода и, соответственно, коэффициента лавинного умножения.

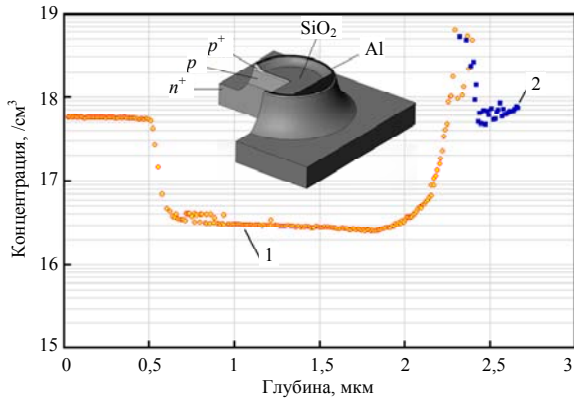


Рис. 1. Распределение профиля концентрации легирующих примесей (1 — бор, 2 — фосфор) и конструкция фотодиода

Исследование влияния на работу фотодиода воздействия мощного лазерного воздействия проводилось в результате сравнения его параметров до и после однократной засветки оптическим импульсом длительностью 4 нс. В качестве источника засветки использовался лазер модели LCS-DTL-122QT с рабочей длиной волны $\lambda = 1,064$, излучение которого фокусировалось на чувствительную площадку фотодиода. Измерение размеров засвечиваемой области проводилось при помощи ПЗС-матрицы, на которую переносилось увеличенное изображение пучка, отраженного от отполированной поверхности, размещенной вместо исследуемых образцов. Обработка полученных с камеры изображений показала, что распределение интенсивности в пятне хорошо аппроксимируется центрально-симметричным гауссовым колоколом с радиусом 11 мкм в сечении по уровню $1/e$ (с погрешностью 2 мкм).

В качестве основных параметров фотодиода измерялись значение темнового тока, чувствительности, а также напряжение смещения, при котором среднее квадратическое значение шума фотодиода составляет $2 \text{ пА/Гц}^{1/2}$. Такой уровень шума был выбран на основе статистики соотношения сигнал/шум, позволяющего обеспечить чувствительность фотоприемных устройств менее 100 нВт.

Одновременно рассчитывался коэффициент умножения фототока, определяемый как отношение сигналов фотоотклика, измеренных в лавинном и безлавинном режимах работы фотодиода. Это проводилось при засветке фотодиода импульсным лазерным излучением с длиной волны 0,817 мкм, сфокусированным в пятно диаметром порядка 20 мкм. Контроль положения пучка на

чувствительной площадке осуществлялся с помощью специального микроскопа, что позволяло (после лазерного воздействия) проводить измерения, фокусируя тестовое излучение на абляционном дефекте и вне его.

Для эксперимента были выбраны 16 фотодиодов из двух партий с незначительным отличием по глубине залегания p – n -перехода. Воздействие проводилось однократно для каждого образца, причем с мощностью излучения, лежащей в диапазоне от 600 до 1700 Вт, что достаточно для образования кратера на поверхности чувствительной площадки.

В результате разрушения лазерным излучением, изменение темнового тока фотодиодов не превышало 10 нА на фоне общего тока 150–180 нА. Зависимость амплитуды фотоотклика от напряжения обратного смещения при засветке неповрежденных участков чувствительной площадки не отличалась от измеренной до воздействия, однако при фокусировке излучения на абляционном кратере наблюдалось ухудшение чувствительности. Однако в лавинном режиме на ряде образцов фотоотклик имел большую амплитуду при засветке разрушенного участка.

Расчет коэффициентов лавинного умножения показал, что в области, подверженной воздействию лазерного излучения, усиление фототока происходит более эффективно. Для определения степени изменения коэффициента лавинного умножения от мощности воздействия для каждого фотодиода было рассчитано отношение коэффициента лавинного умножения в месте разрушения к его значению, определенному до воздействия, при одних и тех же напряжениях обратного смещения. В результате усреднения данных была построена зависимость, представленная на рис. 2, из которой видно, что воздействие приводит к монотонному возрастанию значения коэффициента лавинного умножения в области кратера.

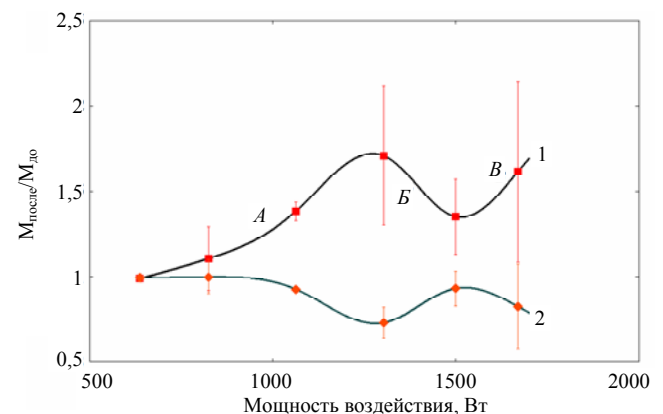


Рис. 2. Относительное изменение коэффициента лавинного умножения: 1 — в области кратера, 2 — на чувствительной площадке при среднее квадратическом шуме фотодиода $2 \text{ пА/Гц}^{1/2}$

Помимо этого, существенным оказался вклад шумов лазерно-индуцированной дефектной области в общий шум фотодиода. В результате уровень шума, соответствующий среднеквадратическому значению фотодиода $2 \text{ пА/Гц}^{1/2}$, достигался при меньших напряжениях обратного смещения. Это привело к снижению значения коэффициента лавинного умножения фототока, относительное изменение которого для неповрежденных участков чувствительной площадки представлено на рис. 2.

Обсуждение результатов

Обнаруженные изменения в работе фотодиода свидетельствуют о нарушении структуры материала вследствие локального воздействия импульсом лазерного излучения. Обоснование отсутствия диффузионных процессов в объеме полупроводника было получено на основе решения уравнения Фика с учетом пространственно-временного температурного распределения, найденного в результате решения одномерного уравнения теплопроводности для случая нагрева германия лазерным импульсом длительностью 4 нс. Пренебрегая изменением напряженности поля в области пространственного заряда вследствие частичного испарения омического p^+ -слоя, можно заключить, что увеличение коэффициента лавинного умножения не вызвано изменением концентрации бора в p -области, где преимущественно развивается ударная ионизация.

Другой предполагаемой причиной более раннего лавинного пробоя является механизм локального пробоя на дефектах, образование которых возможно в результате неравномерного нагрева материала. В этом случае при локальном плавлении германия возникает граница между твердой и жидкой фазой, на которой возрастает механическое напряжение, что и приводит к образованию дислокаций [6].

Для исследования изменений в объеме фотодиода после лазерного воздействия была подготовлена пластина эпитаксиальной структуры с нанесенным просветляющим покрытием. Пластина была расколота на несколько частей, при этом скол имел направление, близкое к перпендикулярному. Воздействие проводилось со стороны просветленной поверхности при совмещенном центре пучка с границей скола. На изображении, представленном на рис. 3 и полученном при расположении пластины под углом в 70 градусов в камере электронного микроскопа фирмы TesCan, видно, что на торцевой грани пластины присутствует рельеф, контур которого, вполне вероятно, соответствует границе плавления материала. Это подтверждает предположение о том, что локальный

нагрев приводит к нарушению кристаллической решетки.

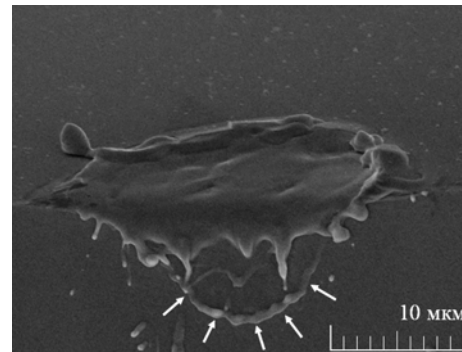


Рис. 3. Внешний вид абляционного дефекта, образованного при воздействии в скол германиевой структуры

Чувствительность ФПУ с частично деградировавшим фотодиодом

В реальных условиях эксплуатации ФПУ локальное выжигание фотодиода возможно при измерении расстояния до цели, если в поле зрения дальномера, например, попадает катафотный объект. В результате деградации фотодиода под действием мощной засветки возрастает количество ложных срабатываний, формируемых ФПУ, что приводит к некорректной работе дальномерной системы.

В этом случае может быть проведена регулировка напряжения смещения на лавинном фотодиоде для обеспечения требуемой вероятности ложной регистрации цели, но при ухудшении чувствительности ФПУ, которую можно оценить на основании полученных в настоящей работе экспериментальных данных.

Однако наиболее типичной является работа дальномера по диффузной цели. В этом случае детектируемое излучение засвечивает всю чувствительную площадку, и поэтому можно пренебречь изменением амплитуды фотоотклика в дефектной области, имеющей значительно меньшие геометрические размеры. Таким образом, ухудшение чувствительности фотоприемного устройства соответствует изменению коэффициента лавинного умножения для неповрежденных участков чувствительной площадки (см. рис. 2). Отметим, что этот коэффициент остается без изменений при мощности лазерного воздействия менее 700 Вт. Это иллюстрируется видеоизменением лазерно-индуцированного дефекта при увеличении мощности воздействия, представленного на рис. 4.

Подтверждение сохранению ограниченной работоспособности ФПУ с фотодиодом, подверженному мощной засветке, было получено для двух ФПУ, выведенных из строя однократной

мощной засветкой. Об этом свидетельствовало наличие на чувствительных площадках фотодиодов абляционных кратеров с диаметром порядка 20 мкм. Повторная регулировка напряжения смещения на фотодиодах позволила обеспечить допустимую вероятность ложной регистрации при чувствительности 290 и 277 нВт соответственно для первого и второго ФПУ.

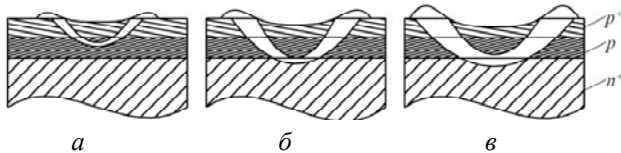


Рис. 4. Видоизменение лазерно-индуцированного дефекта при увеличении мощности воздействия: а — в диапазоне мощностей 700 — 1300 Вт, б — 1500 Вт, в — свыше 1500 Вт

Заключение

Экспериментально обнаружено, что вследствие воздействия лазерного излучения с плотностью мощности, превышающей порог плавления материала, в структуре германиевых лавинных фотодиодов формируются необратимые дефекты, для которых свойственно более раннее развитие процесса лавинного умножения. Исследование объемной структуры абляционных кратеров показало, что изменения в работе p - n -перехода происходят вследствие нарушения кристаллической решетки на границе между твердой и жидкой фазой, формируемой при лазерном нагреве материала.

При однократном превышении мощности воздействия уровня 700 Вт, т. е. при образовании локального дефекта, вклад шумов дефектной области в общий уровень шума фотодиода может привести к возрастанию вероятности ложной регистрации цели, что не позволяет продолжать эксплуатацию фотоприемного устройства в составе дальномерной системы без принятия специальных мер. Однако в работе показано, что в результате снижения напряжения смещения на фотодиоде возможна ограниченная работоспособность фотоприемного устройства, что чрезвычайно актуально для дальномерных систем.

Несмотря на то, что фотодиоды на основе соединений A_3B_5 обладают лучшей чувствительностью в сравнении с германиевыми фотодиодами, применение последних позволяет добиться приемлемой чувствительности ФПУ, сопряженной с повышенными требованиями по стойкости к лазерному излучению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев Г. М., Землянов М. М., Короннов А. А. // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 79.
2. Каталог фирмы, www.cmcelectronics.ca
3. Каталог фирмы, www.lasercomponents.com
4. Dion B., Bélanger N., Lauzon J., et al. // Proc. SPIE. 2010. V. 7684-4. No. 704208. P. 31.
5. Dion B., Lepage P., Bertone N. // IEEE LEOS. 2006. V. 20. No. 5. P. 29.
6. Филаретов С. В., Каушанова Е. А., Зубков Е. Г. и др. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2013. № 3 (27). С. 212.

Characteristics of the germanium avalanche photodiode subjected to a high power laser irradiation

A. A. Koronnov, G. M. Zverev, M. M. Zemlyanov, E. V. Zharicova, and D. V. Marsagishvili

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

Received June 26, 2015

Consideration is given to characteristics of the germanium avalanche photodiode subjected to a high power laser irradiation. The 1.064 μm laser impulse had of 4 ns pulsewidth. The increase of avalanche multiplication and noise in laser-induced defect was discovered. Constancy of photodetector sensitivity after damage induced by laser pulse with peak power below 700 W and focused in the 11 μm radius area was shown.

PACS: 85.60.Dw

Keywords: germanium avalanche photodiode, laser damage, avalanche multiplication factor, noise.

REFERENCES

1. G. M. Zverev, M. M. Zemlyanov, and A. A. Koronov, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 79 (2015).
2. *Catalog*: www.cmcelectronics.ca
3. *Catalog*: www.lasercomponents.com
4. B. Dion, N. Bélanger, J. Lauzon, et al., *Proc. SPIE* **7684-4**, 31 (2010).
5. B. Dion, P. Lepage, and N. Bertone, *IEEE LEOS* **20** (5), 29 (2006).
6. S. V. Filaretov, E. A. Kashtanova, E. G. Zubkov, et al., *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Povolzhskii Region. Fiz.-Mat. Nauki*, No. 3, 212 (2013).