

УДК 662.215

ИНИЦИИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МОСТИКА ПОСЛЕ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

С.-Ж. Го, Л. Чжан, Ш.-Г. Чжу, Я. Ли, П. Ма

Нанкинский научно-технологический университет, 210094 Нанкин, Китай, zhusg@mail.njust.edu.cn

Изучалось разрушение полупроводниковых мостиков типичного и миниатюрного детонаторов в результате воздействия электростатических разрядов. Определялись форма полупроводниковой пленки, изменение сопротивления, инициирующие характеристики и пороговое напряжение их нарушения. Исследовано влияние многократных электростатических разрядов на состояние мостика.

Ключевые слова: электростатический разряд, полупроводниковый мостик, инициирующие характеристики, пороговое напряжение, многократные разряды.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковый мостик (ПМ) — это инициирующий элемент [1], широко используемый как в военных, так и в гражданских целях благодаря таким превосходным качествам, как низкая энергия инициирования, большая скорость срабатывания [2, 3] и высокая степень безопасности [4–6]. Среди других его достоинств следует назвать совместимость с цифровыми логическими устройствами и возможность включения в их состав [7, 8].

Известно, что электростатический разряд может привести к нарушению работы полупроводниковых устройств [9], причем это трудно определить, поскольку дефектное устройство продолжает еще некоторое время работать в нормальном режиме. Электронные компоненты легко подвергаются воздействию электростатических разрядов, когда находятся в области существования электростатических полей [10]. Поэтому представляется необходимым изучение характера разрушения этих компонентов.

Авторы работы [11] использовали разрушающий и неразрушающий тесты для определения характеристик исходных ПМ. Согласно полученным результатам энергия, которая приводит к плавлению мостика ($2.2 \div 3.2$ мДж), не зависит от формы импульса. В работе [12] показано, что разрушение электронных компонентов под действием электростатического разряда обусловлено не-

устойчивостью системы Si/SiO₂ [13], вызванной захватом заряда. В [14] выполнен анализ характеристик разрушения электрических взрывных устройств при действии электростатического разряда и рекомендован новый тип интерферометрического датчика температуры для оценки работоспособности устройств. Авторы [15], используя короткие одиночные импульсы, исследовали влияние электростатических разрядов на электрические взрывные устройства и пришли к выводу, что их температура растет, а время срабатывания увеличивается, следовательно, этот тест позволяет оценивать изменение работоспособности взрывных устройств после действия разрядов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследовали два типа полупроводниковых мостиков — типичный и миниатюрный. И тот и другой представляют собой поликристаллический полупроводник, легированный донорной примесью [16] с концентрацией легирующего элемента (фосфора) около 10^{19} атом/см³. Золотые проволочки присоединяли к контактным площадкам мостиков, которые клеивали эпоксидным компаундом в канавку между выводами керамической вставки.

Типичный и миниатюрный ПМ различаются размерами, формой пленки и сопротивлением. Типичный ПМ спроектирован симметричным с углами 90°, его длина 80 мкм, ширина 380 мкм, толщина 2 мкм, сопротивление около 1.0 ± 0.1 Ом. Миниатюрный ПМ — пленка прямоугольной формы длиной 24 мкм, шири-

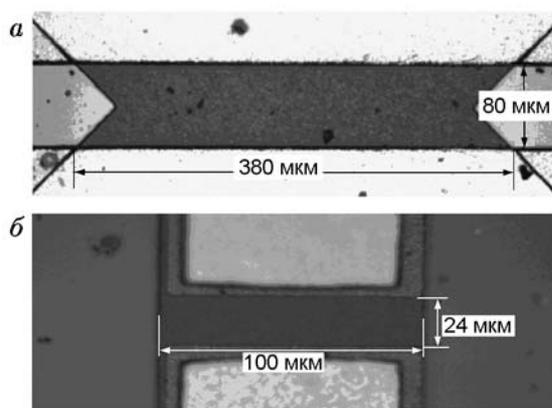


Рис. 1. Полупроводниковые пленки:
а — типичный мостик, б — миниатюрный

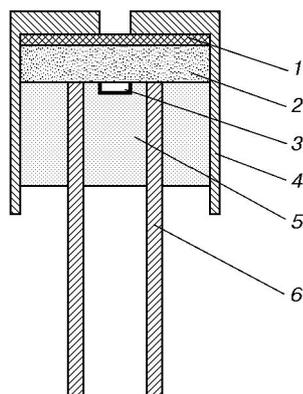


Рис. 2. Структура детонатора:
1 — бумажная прокладка, 2 — стифнат свинца, 3 — полупроводниковый мостик, 4 — оболочка детонатора, 5 — керамическая вставка, 6 — проводочный вывод

ной 100 мкм, толщиной 2 мкм, сопротивление примерно 1.5 ± 0.1 Ом (рис. 1).

Полупроводниковый мостик сначала подвергался воздействию электростатических разрядов. Затем на него подавался импульс тока, он инициировал стифнат свинца, и в это время регистрировались осциллограммы тока и напряжения. Масса навески стифната свинца, которая запрессовывалась в оболочку детонатора под давлением 120 МПа, составляла 20 мг. Структура детонатора показана на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Абляция полупроводникового мостика при действии электростатических разрядов

Типичный ПМ подвергался воздействию электростатического разряда, который создавался конденсатором емкости 10 нФ при разряде через сопротивление 5 кОм. Распределение плотности тока в мостике зависит от его геометрии, а температура выше в тех зонах, где больше плотность тока. Как видно на рис. 3, конструкция мостика такова, что в областях вблизи угловых точек плотность тока наибольшая, следовательно, там выше температура, поэтому они испаряются в первую очередь (поскольку мостик симметричный, показана только одна его сторона). Из-за действия электростатического разряда пленка слабо разрушалась, и площадь абляции (зоны расплава) увеличивалась с ростом напряжения этого разряда (U_{esd}). Результаты измерения площади абляции типичного ПМ при помощи лазерного конфокального сканирующего микроскопа представлены в табл. 1.

Соотношение между долей мостика, подвергнутой абляции (W), и напряжением электростатического разряда описывается выражением

$$W = 24.72 - 2.44U_{esd} + 0.06U_{esd}^2 \quad (U_{esd} \geq 21 \text{ кВ}). \quad (1)$$

Миниатюрный ПМ также подвергался действию электростатического разряда, при этом емкость конденсатора составляла 500 пФ, а разрядное сопротивление 5 кОм (рис. 4). Как видно на рис. 4, после воздействия разряда небольшая часть кремниевой пленки расплавилась в горячих точках, а при достаточно большом напряжении электростатического разряда зона расплава может распространиться на весь мостик. Пленка миниатюрного ПМ прямоугольная, поэтому из-за краевого эффекта в первую очередь испарялись ее края. Здесь, подобно типичному ПМ, площадь абляции также увеличивается с ростом U_{esd} (см. табл. 1). Соотношение между долей площади абляции миниатюрного ПМ и напряжением электростатического разряда описывается выражением

$$W = 48.06 - 4.18U_{esd} + 0.09U_{esd}^2 \quad (U_{esd} \geq 23 \text{ кВ}). \quad (2)$$

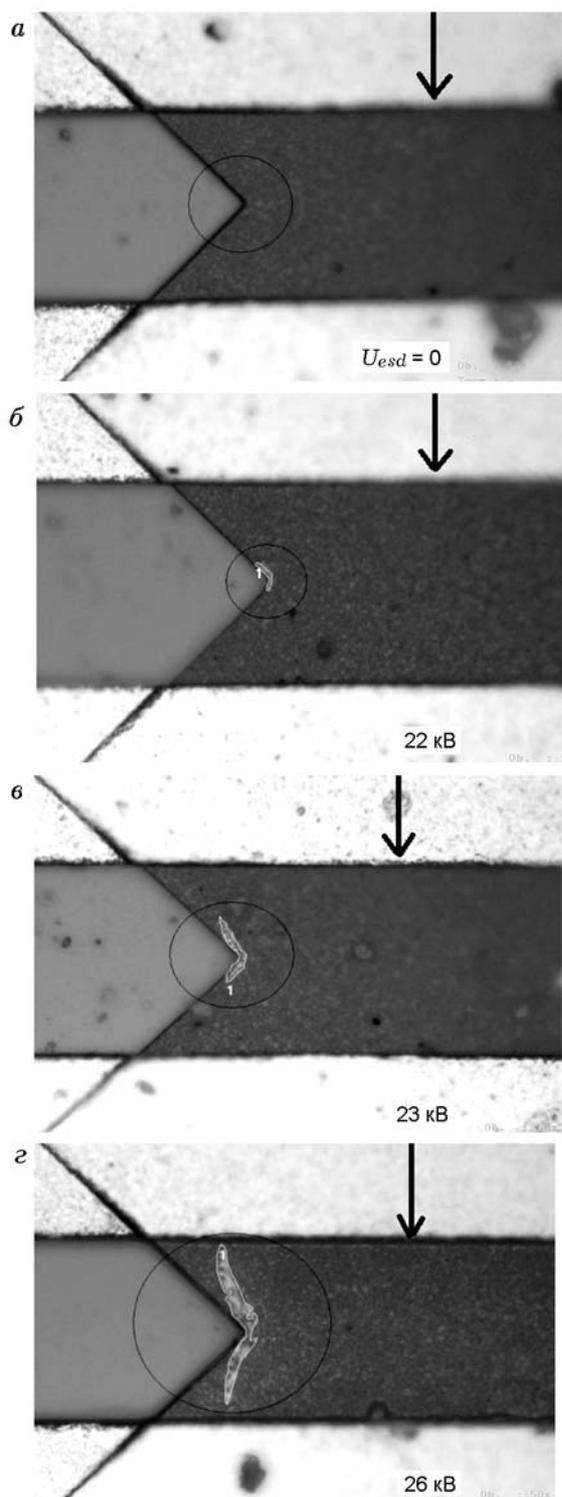


Рис. 3. Вид типичного ПМ при электростатическом разряде и без него (стрелки указывают направление тока)

Таблица 1

Доля площади типичного и миниатюрного полупроводниковых мостиков, подвергнутая абляции, в зависимости от напряжения электростатического разряда

U_{esd} , кВ	Абляция, %	U_{esd} , кВ	Абляция, %
Типичный		Миниатюрный	
0	0	0	0
21	0.04	23	0.97
22	0.16	24	1.33
23	0.46	25	1.47
26	1.97	26	2.13
		27	2.88

Как видно, пленка миниатюрного ПМ более чувствительна к действию электростатических разрядов и сильнее разрушается, чем пленка типичного ПМ.

Иницирующие характеристики полупроводникового мостика после действия электростатических разрядов

При протекании тока по полупроводниковому мостику он нагревается и начинает плавиться. Вокруг мостика образуется слабо ионизированная кремниевая плазма [17], в дальнейшем весь кремниевый мостик испаряется, образуя горячую плазму [18], которая быстро инициирует взрывчатое вещество.

Для определения напряжения, при котором вероятность инициирования достигает 50 % (U_{50}), а также для расчета стандартного отклонения (δ) был использован D-оптимальный критерий Нейера [19]. Этот метод позволяет оценить распределение параметров даже в случае ограниченного набора данных. Эксперименты проводили с 20 образцами. Для оценки иницирующей способности полупроводникового мостика анализировались три параметра: полное иницирующее напряжение (U_{ign}); энергия, выделяемая в мостике (E_{ign}); время инициирования (t_{ign}). Полное иницирующее напряжение — это напряжение, при котором полупроводниковый мостик гарантированно инициирует взрывчатое вещество. Энергия, подводимая к мостику, рассчитывалась по выражению $E = \int U I dt$ (U — падение напряжения на полупроводниковом мостике, I — ток, текущий по нему); время инициирования отра-

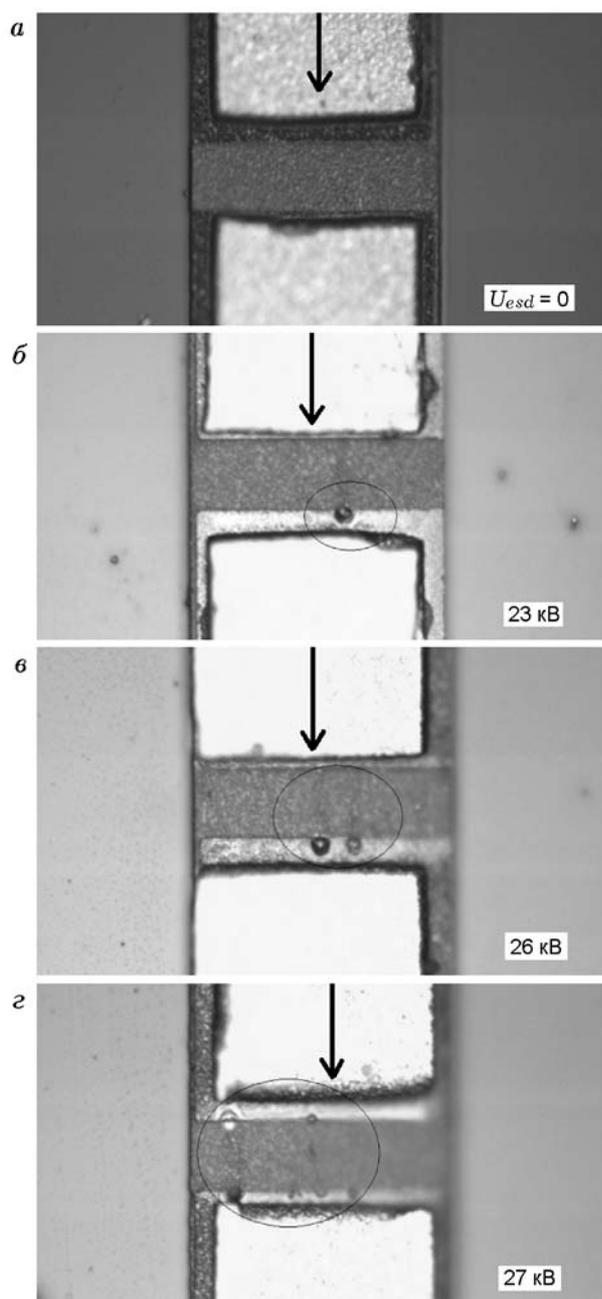


Рис. 4. Вид миниатюрного ПМ при электростатическом разряде и без него (стрелки указывают направление тока)

жает реакцию первичного взрывчатого вещества на состояние мостика.

Иницирующие характеристики типичного ПМ после действия электростатического разряда и без него приведены в табл. 2. Как следует из данных этой таблицы, типичные ПМ, подвергнутые действию разряда, характеризуются меньшим полным напряжением ини-

цирования, меньшей энергией иницирования и более длительным временем иницирования. Эти различия становятся все более очевидными с ростом напряжения разряда. Все это свидетельствует о том, что после воздействия электростатических разрядов мостик приобретает большую чувствительность.

Результаты подобных экспериментов для миниатюрного ПМ представлены в табл. 3. Из этих данных следует, что электростатика меняет свойства миниатюрного ПМ: его полное иницирующее напряжение после действия электростатического разряда ниже, чем у исходного мостика; энергия, подводимая к мостику, ведет себя таким же образом. Интересно, что есть некоторое нелогичное изменение времени иницирования у миниатюрного мостика после действия разряда, а именно: при подаче на него иницирующего напряжения более 5 В (когда осуществляется режим плазменного иницирования) время иницирования у миниатюрного ПМ после действия электростатического разряда больше, чем у исходного мостика, хотя должно быть меньше.

Одним словом, все три иницирующих параметра показывают, что полупроводниковые мостики после действия электростатического разряда становятся более чувствительными по сравнению с исходными. Кроме того, пороговая энергия иницирования у миниатюрных мостиков меньше, чем у типичных, т. е. они больше подвержены разрушению при действии электростатического разряда.

Пороговое напряжение отказа

Пороговое напряжение электростатического разряда находили по критерию Стьюдента. Использовали результаты 10 опытов, поэтому область изменения рабочих характеристик мостика определялась условием $|t| \geq t_{0.025}(9) = 2.2622$.

Этот критерий использован для определения энергии иницирования и времени срабатывания типичного ПМ. Установлено, что $|t| > 2.2622$ при напряжении электростатического разряда больше 22 кВ. Это указывает на то, что мостик после действия такого электростатического разряда существенно отличается от исходного. Наоборот, при напряжении, меньшем 22 кВ, $|t| < 2.2622$ и, следовательно, явного различия между исходным мостиком и мостиком после действия электростатического разряда нет.

Т а б л и ц а 2

Иницирующие характеристики типичного ПМ при действии электростатического разряда и без него

U_{esd} , кВ	U_{ign} , В	U_{50} , В	U_f , В	t_{ign} , мкс	E_{ign} , мкДж	I_{max} , А	$t_{i,max}$, мкс	δ
0	7.49	7.16	6.84	68.17	818.03	4.27	1.24	0.11
21	7.41	6.71	6.02	68.20	790.59	4.25	1.39	0.22
22	7.34	6.67	6.00	75.09	775.14	4.19	1.62	0.22
23	7.23	6.66	6.09	81.05	737.86	4.11	1.99	0.18
26	6.88	6.57	6.26	83.07	682.91	4.00	2.56	0.10

П р и м е ч а н и я. I_{max} — максимальный ток, U_f — напряжение, при котором мостик заведомо не инициирует взрывчатое вещество, $t_{i,max}$ — время, за которое ток достигает максимального значения.

Т а б л и ц а 3

Иницирующие характеристики миниатюрного ПМ при действии электростатического разряда и без него

U_{esd} , кВ	U_{ign} , В	U_{50} , В	U_f , В	t_{ign} , мкс	E_{ign} , мкДж	I_{max} , А	$t_{i,max}$, мкс	δ
0	5.72	4.64	3.56	64.41	129.83	3.68	10.01	0.35
13	5.62	4.60	3.58	66.72	133.26	3.49	11.81	0.33
14	5.58	4.71	3.85	66.25	144.45	3.45	13.22	0.28
15	5.52	4.62	3.73	67.37	138.99	3.41	13.88	0.29
17	5.46	4.32	3.17	69.32	144.50	3.38	14.92	0.37
19	5.38	4.51	3.64	78.49	192.81	3.32	14.98	0.28
23	5.05	4.00	2.95	68.02	155.97	1.51	1.23	0.34
24	4.83	3.87	2.91	56.56	157.33	1.47	1.28	0.31
25	4.72	3.79	2.87	51.67	263.12	1.45	1.32	0.30
26	4.63	3.86	3.09	61.34	169.17	1.42	1.36	0.25
27	4.55	3.68	2.82	60.89	185.16	1.39	1.45	0.28

Для миниатюрного мостика определение энергии инициирования и времени срабатывания по критерию Стьюдента дало сходные результаты. Пороговое напряжение оказалось равным 14 кВ. При большем напряжении $|t| > 2.2622$, следовательно, характеристики исходного мостика и мостика после действия электростатического разряда явно отличаются, при меньшем напряжении — нет.

Проведенный анализ показал, что электростатический разряд влияет на иницирующие характеристики полупроводниковых мостиков и делает их более чувствительными.

Вольт-амперные характеристики полупроводниковых мостиков

Сопротивление является одним из наиболее важных параметров ПМ, поэтому необхо-

димо исследовать флуктуацию сопротивления в ходе инициирования. Наклон вольт-амперной характеристики — это I/V (т. е. $1/R$), поэтому в данной работе анализ зависимостей $I(V)$ использован для определения характеристик ПМ до и после действия электростатических разрядов. Для этого проведен тест, в котором к мостикку подключалось постоянное напряжение. Как видно на рис. 5, характеристики ПМ до и после действия электростатических разрядов различаются так же, как при действии разрядов с различным напряжением.

Для типичного ПМ (см. рис. 5,а) наклон вольт-амперных характеристик уменьшается по мере роста напряжения электростатического разряда и характеристики, относящиеся к мостикку после воздействия разряда, расположены ниже вольт-амперной характеристи-

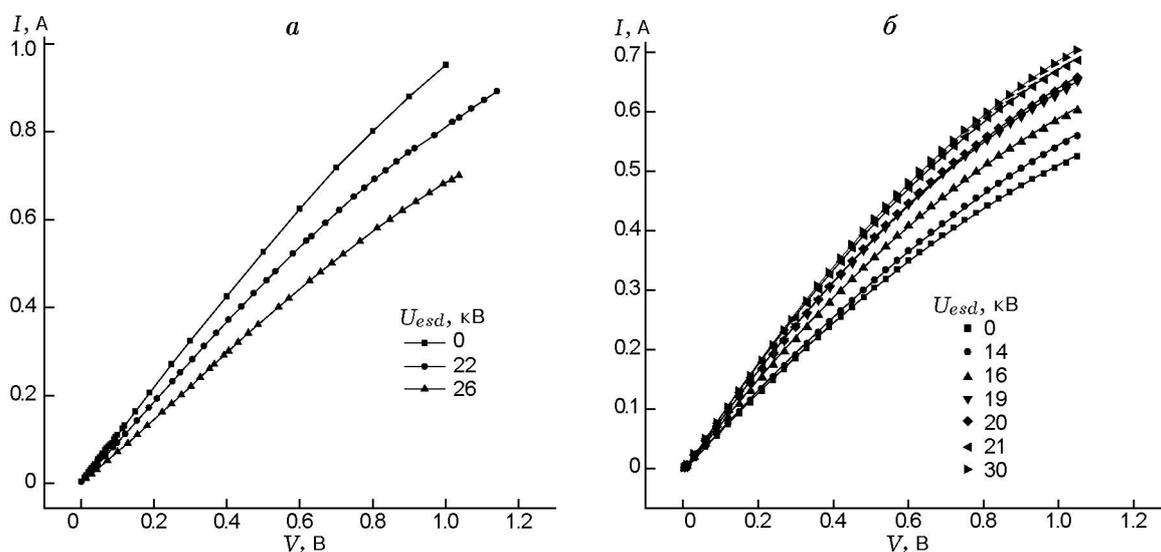


Рис. 5. Зависимости $I(V)$ при наличии электростатического разряда и без него для типичного (а) и миниатюрного (б) полупроводниковых мостиков

ки исходного мостика. Для исходного мостика тангенс угла наклона характеристики составляет 0.99, при напряжении разряда 22 кВ он равен 0.82, а при 26 кВ — 0.69. На основе проведенного выше анализа установлено, что пороговое напряжение разряда равно 22 кВ, и это соответствует наклону зависимости $I(V)$, равному 0.82, поэтому при значениях наклона, меньших 0.82, инициирующие характеристики типичного ПМ не являются нормальными.

В противоположность этому наклон вольт-амперных характеристик миниатюрного ПМ (см. рис. 5, б) увеличивается вместе с ростом напряжения и все характеристики, относящиеся к мостику после воздействия разряда, расположены выше характеристики исходного мостика. Поскольку для миниатюрного ПМ пороговое напряжение разряда 14 кВ, а соответствующий этому напряжению наклон зависимости $I(V)$ равен 0.54, то при значениях наклона, больших 0.54, инициирующие характеристики миниатюрного ПМ не являются нормальными.

Этот тест был проведен пять раз при одних и тех же условиях и дал идентичные результаты, поэтому особенности I - V -характеристик могут рассматриваться в качестве критерия определения нормального состояния ПМ после действия электростатического разряда.

Особенности действия многократных электростатических разрядов

Для исследования влияния многократных электростатических разрядов использовалась электрическая цепь, в которой конденсатор емкостью 500 пФ при напряжении 25 кВ разряжался через последовательно включенное сопротивление 5 кОм.

У типичного ПМ зоны плавления не обнаружено даже при 12 электростатических разрядах и сопротивление до разрядов и после оставалось почти постоянным. Зависимости $I(V)$, полученные при различном числе разрядов, близки друг к другу. Энергия, поступающая в мостик, согласно расчету составляет около 0.03 мДж, что намного меньше пороговой энергии инициирования. Большая поверхность пленки и хорошая диссипация тепла не дают энергии возможности аккумулироваться при увеличении числа разрядов.

Для миниатюрного ПМ площадь абляции возрастает по мере увеличения числа электростатических разрядов, и при 8 разрядах он может полностью разрушиться (рис. 6). По-видимому, из-за малых размеров миниатюрного ПМ (24×100 мкм) не успевает происходить диссипация энергии, подводимой к мостику. В табл. 4 представлена доля площади миниатюрного ПМ, подвергнутая абляции при многократных электростатических разрядах. Соотношение между долей площади, подвергшейся абляции (W), и числом электростатических

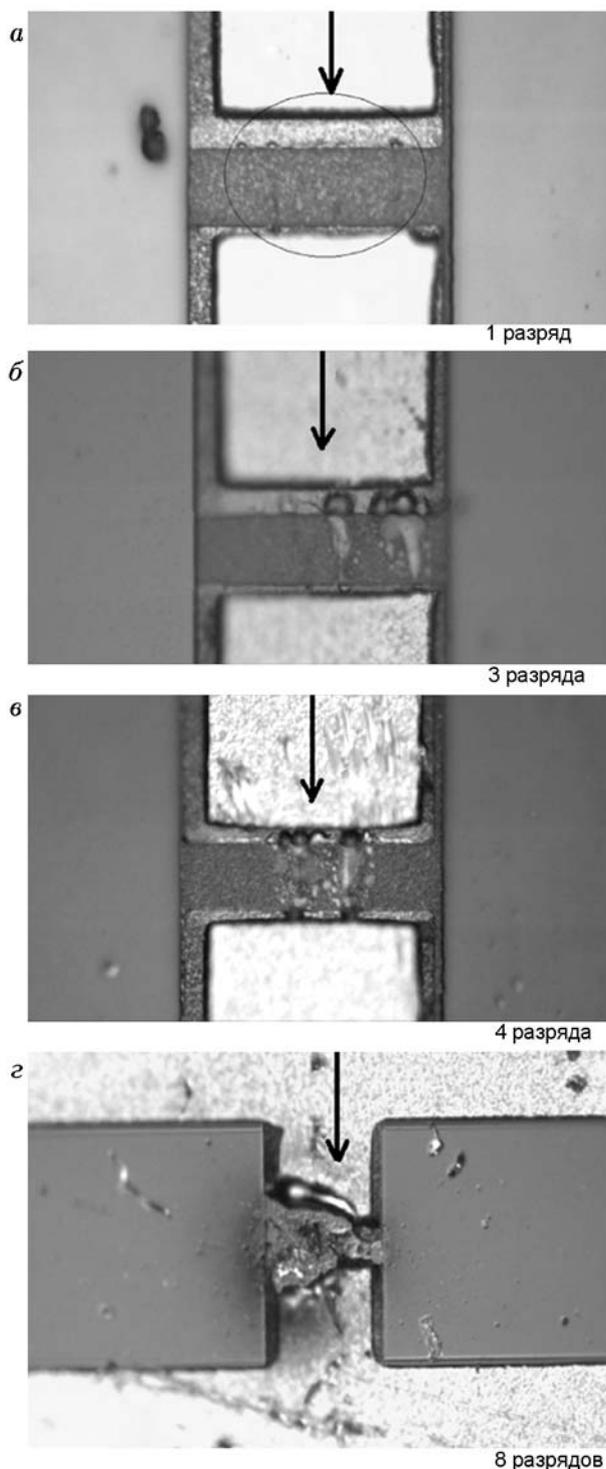


Рис. 6. Вид миниатюрного ПМ при многократных разрядах

Таблица 4
Часть площади миниатюрного ПМ, подвергнутая абляции, при различном числе электростатических разрядов

Число разрядов	Абляция, %
1	1.47
2	10.97
3	27.89
4	38.69
8	100

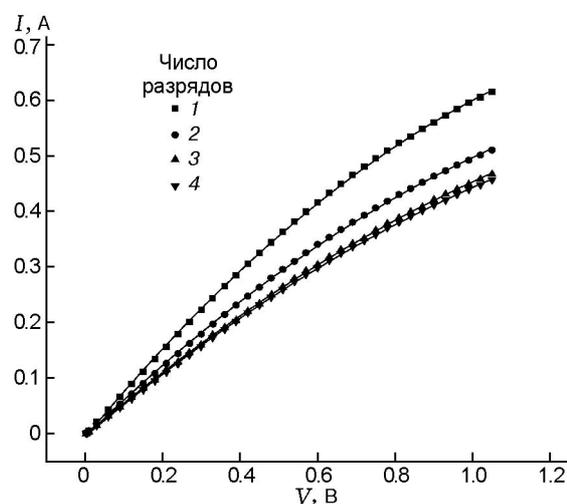


Рис. 7. Зависимости $I(V)$ для миниатюрного ПМ при многократных электростатических разрядах

разрядов (C) описывается выражением

$$W = 243.79 \exp \frac{C}{23.33} - 254.72 \quad (0 < C \leq 8). \quad (3)$$

Сопротивление миниатюрного ПМ при многократном воздействии разрядов резко меняется, на что указывает существенное различие кривых $I(V)$ (рис. 7): их наклон уменьшается по мере увеличения числа разрядов.

Результаты показывают, что уже при 8 разрядах характеристики миниатюрного ПМ отклоняются от нормы, в то время как характеристики типичного ПМ не меняются даже при 12 разрядах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электростатический разряд влияет на иницирующие характеристики как типичных,

так и миниатюрных мостиков. С ростом напряжения электростатического разряда площадь абляции увеличивается. Полупроводниковые мостики после действия электростатического разряда имеют меньшее полное напряжение инициирования, меньшую энергию инициирования и большее время достижения максимума тока по сравнению с исходными мостиками. Все это указывает на то, что электростатический разряд делает мостики более чувствительными. Определены пороговые напряжения электростатического разряда, при превышении которых характеристики мостиков выходят из нормы — 22 кВ для типичного и 14 кВ для миниатюрного мостика. Анализ вольт-амперных характеристик полупроводниковых мостиков позволяет определить критерии их нормального состояния. Результаты данной работы полезны при разработке конструкций полупроводниковых детонаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bickes R. W., Jr.** Smart semiconductor bridge (SCB) igniter for explosives // 3rd Canadian Symp. on Mining Automation, Montreal, Quebec, September 14–16, 1988.
2. **Tovar B. A. M.** Electrothermal transients in highly doped phosphorous diffused silicon-on-sapphire semiconductor bridge under high current density conditions. — New Mexico: Univ. of New Mexico Press, 1993.
3. **Ма П., Чжан Линь, Чжу Ш., Чжан Лэй, Чень Х.** Бесплазменное иницирование стифната свинца полупроводниковым мостиком // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 1. — С. 115–122.
4. **Benson D. A., Larsen M. E., Renlund A. M., et al.** Semiconductor bridge: a plasma generator for the ignition of explosives // J. Appl. Phys. — 1987. — V. 62, N 5. — P. 1622–1632.
5. **Wu R., Zhu S.-G., Zhang L., et al.** Experimental investigation on the temperature of semiconductor bridge (SCB) plasma // 2007 IASPEP Intern. Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Xi'an, China, October 23–26, 2007.
6. **Zhu F.-C., Xu Z.-X., Chen X.-W., et al.** Progress on the semiconductor bridge initiator // Acta Armamentarii. — 2003. — V. 24, N 1. — P. 106–110.
7. **Matveev I., Matveeva S., Korolev Yu. D., et al.** A multi-mode plasma pilot // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, January 8–11, 2007. — AIAA paper 2007-939.
8. **Liu M.-F., Zhang X.-B.** Semiconductor bridge U-I properties in ignition process // J. Ballistics. — 2010. — V. 22, N 4. — P. 70–72.
9. **Gorlov M. I., Vortontsov I. V., Andreev A. V.** Effect of electrostatic discharge on semiconductor devices and subsequent annealing of electrostatic defects // Measurement Techn. — 1998. — V. 41, N 1. — P. 65–67.
10. **Guo X.-R., Zhu S.-G., Zhang L., et al.** Ignition characteristics of non-electrostatic discharge and electrostatic discharge on semiconductor bridge // Chin. J. Energetic Mater. — 2012. — V. 20, N 1. — P. 99–104.
11. **Prinse W. C., Bouma R. H. B., Griffiths T. T., et al.** Constant current testing of a Semiconducting Bridge initiator // 51st Annu. Fuse Conf., Nashville, TN, 2007.
12. **Yang J., Wu Z.-C., Zhang X.-J., et al.** The overview of potential invalidation of the MOS device with the electrostatic discharge // J. Hebei Univ. of Sci. and Technol. — 2011. — V. 32. — P. 34–36.
13. **Yang G.-L., Jiao Q.-J., Jin Z.-X., et al.** Electrothermal energy conversion mechanism of micro-scale semiconductor bridge // J. Beijing Inst. of Technol. — 2011. — V. 20, N 1. — P. 23–28.
14. **Chang Y., Gao C.-J., Chen Z.-W., et al.** Research on the measurement and evaluation method of EED' electromagnetism impulse harm // J. Projectiles Rockets Missiles and Guidance. — 2007. — V. 27, N 5. — P. 183–185.
15. **Mu L.-J., Gao J.-G., Zhang Y.-L.** Effect mechanism analysis and test investigation of electrostatic stimulus on electric explosive devices // Industr. Safety and Environ. Protection. — 2010. — V. 36, N 5. — P. 39–40.
16. **Feng H.-Y., Li Y., Zhang L., et al.** Measurement of the semiconductor bridge (SCB) plasma temperature by the double line of atomic emission spectroscopy // Chin. J. Energ. Mater. — 2007. — V. 15, N 2. — P. 134–136.
17. **Zhou B., Mao G.-Q., Qin Z.-C., et al.** Effect of V-type angle and hole of semiconductor bridge on electro-explosive performance // Chin. J. Energ. Mater. — 2009. — V. 17, N 3. — P. 349–352.
18. **Ma P., Zhu S.-G., Xu D.-W., et al.** Study on the ignition character of lead azide by semiconductor bridge // Initiators and Pyrotechnics. — 2010. — V. 2, N 1. — P. 10–13.
19. **Neyer B. T.** A D-optimality-based sensitivity test // Technometrics. — 1994. — V. 36, N 1. — P. 61–70.

*Поступила в редакцию 13/1 2012 г.,
в окончательном варианте — 15/V 2012 г.*