

УДК 621.315.592

РАДИАЦИОННО–ИНДУЦИРОВАННАЯ ДЕГРАДАЦИЯ КМОП–ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОЩНОСТИ ДОЗЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

© 2015 г. К. И. Таперо^{1,2}, А. С. Петров¹, В. Н. Улимов¹¹ФГУП «Научно–исследовательский институт приборов»,
промзона Тураево, стр. 8, Лыткарино, Московская обл., 140080, Россия²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия

Исследована деградация КМОП–операционных усилителей с биполярным и КМОП–входным каскадом при облучении с различными значениями мощности дозы и температуры. Показано, что такие микросхемы могут быть подвержены как повышенной чувствительности к низкоинтенсивному облучению, так и зависящим от времени эффектам. При исследованиях операционных усилителей, содержащих только КМОП–элементы, выявлены некоторые особенности, присущие радиационному отклику изделий биполярной технологии, например усиление деградации при увеличении температуры облучения. Это не типично для большинства изделий КМОП–технологии. На основе полученных результатов показано, что методы радиационных испытаний приборов и микросхем, содержащих как биполярные, так и КМОП– или МОП–элементы, должны объединять существующие подходы к испытаниям МОП– и биполярных приборов.

Установлено, что при измерении в процессе испытаний входного тока операционных усилителей с КМОП–входным каскадом необходимо учитывать влияние ионизационного тока, генерируемого при облучении. Этот ток может быть оценен как разность значений входного тока, измеренных в процессе облучения и сразу же после прерывания облучения.

Ключевые слова: операционные усилители, дозовые ионизационные эффекты, эффекты низкоинтенсивного облучения.

Введение

Облучение при низкой мощности дозы может вызвать отклик исследуемых приборов и интегральных схем, существенно отличный от полученного при высокой мощности дозы. Существуют два вида эффектов низкоинтенсивного облучения: истинные эффекты мощности дозы (**TDRE** — *true dose rate effects*) и зависящие от времени эффекты (**TDE** — *time-dependent effects*). Понятие TDE подразумевает, что степень деградации по окончании длительного низкоинтенсивного облучения приблизительно совпадает со степенью деградации при высокоинтенсивном облучении до того же уровня дозы с последующим отжигом при комнатной температуре, если при этом суммарное время высокоинтенсивного облучения и отжига совпадает с длительностью низкоинтенсивного облучения. Понятие TDRE подразумевает, что степень деградации по окончании длительного низкоинтенсивного облучения отличается от степени деградации при высокоинтенсивном облучении до того же уровня дозы с последующим отжигом при комнатной температуре, если при этом сум-

марное время высокоинтенсивного облучения и отжига совпадает с длительностью низкоинтенсивного облучения. Аналоговые биполярные приборы и микросхемы могут быть чувствительны к TDRE [1–8]. Это проявляется в повышенной чувствительности к воздействию низкоинтенсивного ионизирующего излучения (**ELDRS** — *enhanced low dose rate sensitivity*). В свою очередь, TDE присущи, как правило, МОП– и КМОП–приборам [1, 9–13].

Для моделирования TDE в МОП– и КМОП–приборах успешно применяют высокоинтенсивное облучение с последующим высокотемпературным отжигом (или отжигом при комнатной температуре). В случае биполярных приборов, подверженных ELDRS, радиационные испытания обычно проводят при мощности дозы $\leq 0,01$ рад(Si)/с. Также могут применять различные виды ускоренных испытаний, например облучение при высокой интенсивности и повышенной температуре (как правило, 100 °C).

Цель работы — исследование деградации аналоговых приборов, содержащих как биполярные, так и КМОП–элементы, и сравнение ее

с деградацией аналоговичных приборов, содержащих только КМОП–элементы.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследований были выбраны КМОП–операционные усилители с входными напряжениями, соответствующими полному диапазону напряжения питания, с биполярным (TLV2451CP) и КМОП– (TLV2471CP) входным каскадами. Производитель — Texas Instruments. На рис. 1 [14] представлены упрощенные схемы входных каскадов исследованных операционных усилителей.

Результаты и их обсуждение

Операционные усилители TLV2451CP (биполярный входной каскад) облучали гамма–квантами ^{60}Co при комнатной температуре ($25 \pm 5^\circ\text{C}$) и мощности дозы 0,01, 7,8, 11,2 и 15,7 рад(Si)/с. При мощности дозы 7,8 рад(Si)/с эти приборы также облучали при температуре 70, 85 и 100°C . После облучения дозой 2 и 4 крад(Si) проводили отжиг при комнатной температуре. Кроме того, после облучения дозой 6 крад(Si) проводили отжиг при повышенной температуре 70°C в течение 168 ч.

В предыдущих исследованиях [15] было показано, что значение напряжения смещения нуля усилителей TLV2451CP превышает допустимый уровень при облучении дозой порядка 337 крад(Si). Тогда как для входного тока смещения это происходит при существенно меньших дозах — порядка 5 крад(Si). Следовательно, можно сделать вывод, что входной ток смещения следует рассматривать как наиболее критичный параметр, отображающий деградацию исследуемых операционных усилителей при облучении. По этой причине в дальнейших исследованиях данный параметр рассматривали как информативный.

На рис. 2 показаны дозовые зависимости изменения входного тока смещения ΔI_b , полученные при мощности дозы 7,8 рад(Si)/с и различных температурах при облучении. Из рис. 2 видно, что степень деградации исследованных операционных усилителей увеличивается с температурой облучения. Такое поведение присуще биполярным линейным микросхемам, чувствительным к эффекту ELDRS [1—3, 8, 16—22]. На рис. 2 также для сравнения показана дозовая зависимость ΔI_b для облучения при мощности дозы 0,01 рад(Si)/с и комнатной температуре. Видно, что облучение при 7,8 рад(Si)/с и 100°C дает уровень деградации, близкий к случаю облучения при 0,01 рад(Si)/с и комнатной температуре. Однако, в соответствии с техническим описанием, максимальная рабочая температура для данных приборов составляет 70°C . Выдержка их при температуре 100°C , превышающей максимальную допустимую температуру, может привести к отказу исследуемого прибо-

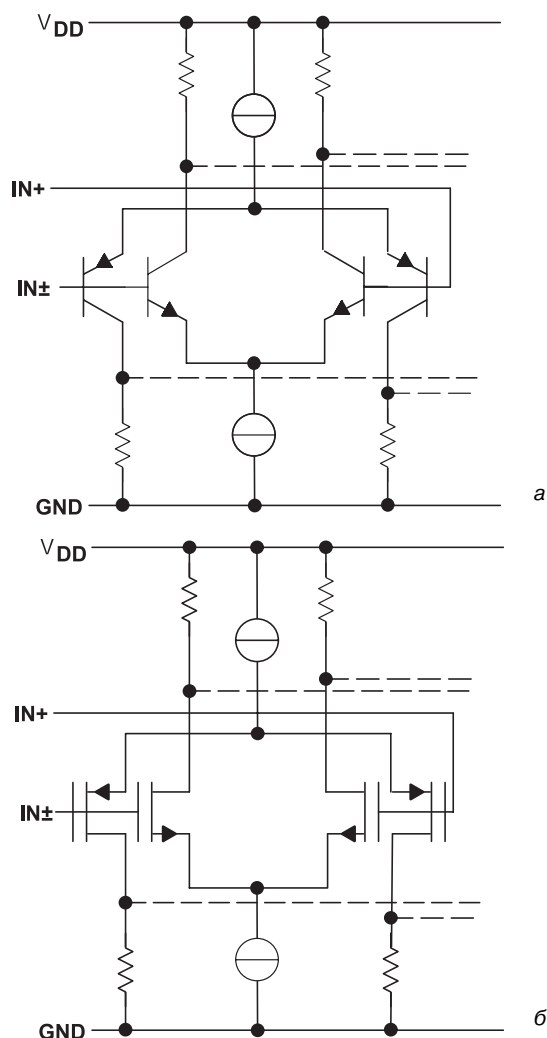


Рис. 1. Схемы биполярного (TLV2451CP) (а) и КМОП– (TLV2471CP) (б) входного каскадов исследованных операционных усилителей

Fig. 1. Schematics of (a) Bipolar (TLV2451CP) and (б) CMOS (TLV2471CP) Input Cascades of the Operational Amplifiers

ра, не связанному с радиационно–индуцированными процессами. В частности, в настоящей работе после выдержки при температуре 100°C наблюдали отказ по значению напряжения смещения нуля.

На рис. 3 представлены дозовые зависимости изменения входного тока смещения, полученные при разных значениях мощности дозы. Из рис. 3 видно, что степень деградации исследованных приборов возрастает при уменьшении мощности дозы, что также свойственно линейным биполярным микросхемам. В случае МОП–приборов такое поведение может наблюдаться, когда основной вклад в деградацию приборов при облучении дают процессы встраивания поверхностных состояний [1, 9, 11, 13, 15].

На рис. 4 представлено сравнение деградации приборов при облучении с мощностью дозы 0,01 рад(Si)/с при комнатной температуре с деградацией при облучении с мощностью дозы 11,2 рад(Si)/с и последующим отжигом при комнатной температуре. Отжиг проводили после облучения дозой 2 и 4 крад(Si). Суммарное время облучения

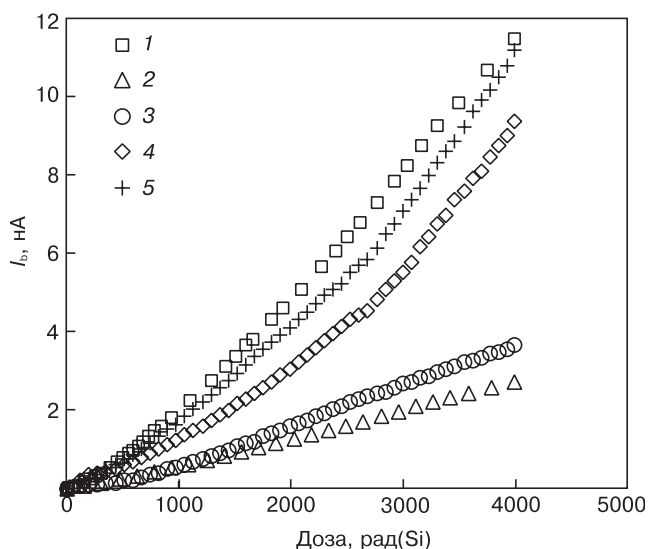


Рис. 2. Дозовые зависимости изменения входного тока смещения операционного усилителя TLV2451CP при мощности дозы 0,01 (1) и 7,8 (2–5) рад (Si)/с в зависимости от температуры облучения T , °C: 1, 2 – 25; 3 – 70; 4 – 85; 5 – 100

Fig. 2. Dose Functions of Input Bias Current of TLV2451CP Operational Amplifier at Doses of (1) 0.01 and (2–5) 7.8 rad(Si)/s for Different Irradiation Temperatures, °C: (1 and 2) 25; (3) 70; (4) 85; (5) 100

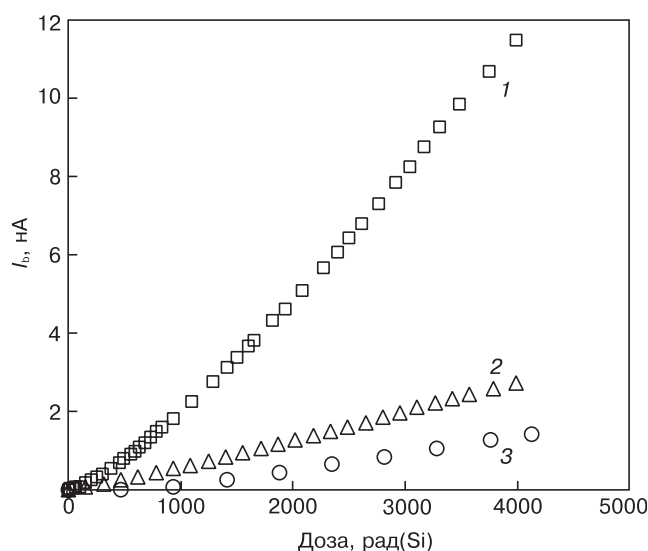


Рис. 3. Дозовые зависимости изменения входного тока смещения операционного усилителя TLV2451CP в зависимости от мощности дозы при облучении: 1 – 0, 01 рад (Si)/с; 2 – 7,8; 3 – 15,7

Fig. 3. Dose Functions of Input Bias Current of TLV2451CP Operational Amplifier for Irradiation Doses: (1) 0.01 rad (Si)/s; (2) 7.8; (3) 15.7

при 11,2 рад(Si)/с и последующего отжига было равно времени облучения при 0,01 рад(Si) до соответствующих уровней поглощенной дозы.

Представленные на рис. 4 результаты свидетельствуют о том, что TDE определенно вносят значительный вклад в повышенную деградацию исследуемых приборов, наблюдающуюся при низкоинтенсивном облучении. Повышенная чувствительность исследуемых приборов к низкоинтенсивному облучению не может определяться только TDE,

поскольку облучение при 0,01 рад(Si)/с приводит к более высокому уровню деградации, чем в случае облучения при высокой интенсивности с последующим отжигом при комнатной или повышенной температуре. Аналогичные результаты были получены при облучении операционных усилителей TLV2451CP при мощности дозы 15,7 рад(Si)/с до уровня поглощенной дозы 6 крад(Si) с последующим отжигом при 70 °C в течение 168 ч. Таким образом, можно заключить, что исследованные операционные усилители чувствительны как к TDE, так и к TDRE.

Операционные усилители TLV2471CP (КМОП-каскад на входе) облучали гамма-квантами ^{60}Co при комнатной температуре (25 ± 5 °C) и мощности дозы 0,01, 1,4, 9,7 и 62,7 рад(Si)/с. При мощности дозы 9,7 рад(Si)/с эти приборы также облучали при температуре 70, 85 и 100 °C. После облучения дозой 2 и 4 крад(Si) проводили отжиг при комнатной температуре. Отжиг при повышенной температуре для этих приборов не проводили.

На рис. 5, а представлены дозовые зависимости изменения входного тока смещения, полученные при разных значениях мощности дозы и комнатной температуре. Изменения входного тока смещения максимальны при облучении с наибольшей мощностью дозы — 62,7 рад(Si)/с (см. рис. 5, а). Такая картина обычно наблюдается, когда исследуемые приборы чувствительны к TDE. При этом основной вклад в деградацию дают процессы встраивания заряда в диэлектриках. На рис. 5, б представлены результаты, которые более присущи изделиям, подверженным эффекту ELDRS, наблюдаемому обычно в биполярных приборах. На рис. 5, б показаны дозовые зависимости изменения входного тока смещения, по-

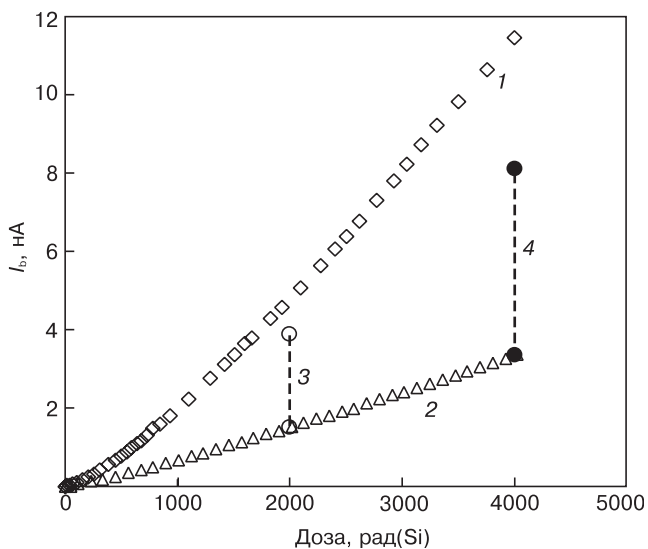


Рис. 4. Дозовые зависимости изменения входного тока смещения операционного усилителя TLV2451CP при разных значениях мощности дозы и отжиге при 25 °C: 1 – 0, 01 рад (Si)/с; 2 – 11,2; 3 – 2000; 4 – 4000

Fig. 4. Dose Functions of Input Bias Current of TLV2451CP Operational Amplifier for Different Dose Power and Annealing at 25°C: (1) 0.01 rad (Si)/s; (2) 11.2; (3) 2000; (4) 4000

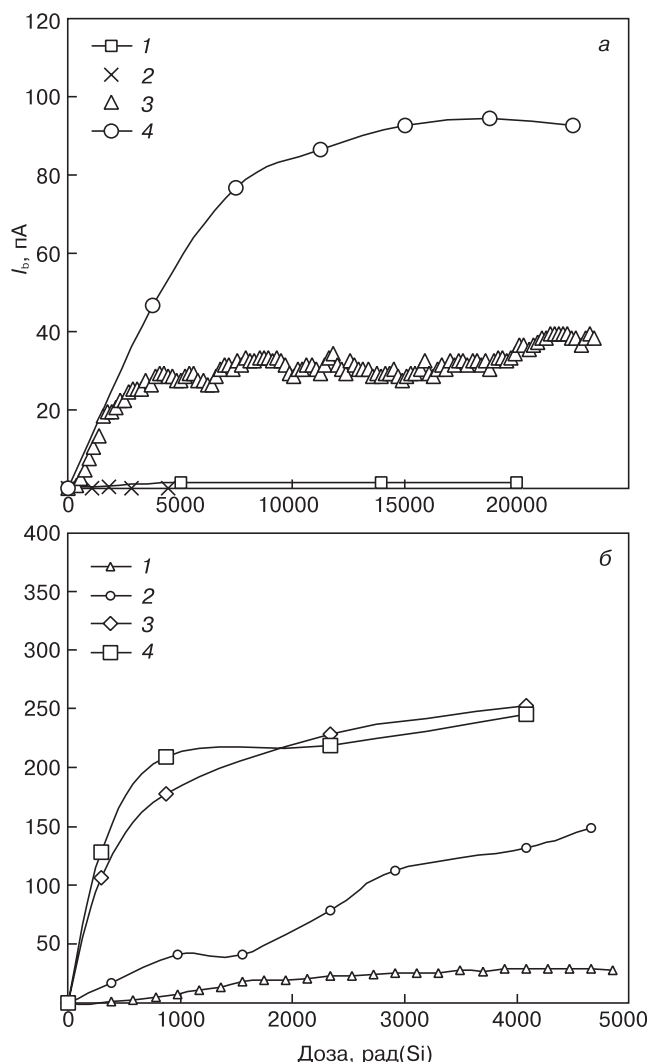


Рис. 5. Дозовые зависимости изменения входного тока смещения операционного усилителя TLV2471CP в зависимости от мощности дозы при облучении (а) и температуры облучения (б):
а: 1 — 0,01 рад (Si)/с; 2 — 1,4; 3 — 9,7; 4 — 62,7;
б: 1 — 25 °C; 2 — 70; 3 — 85; 4 — 100

Fig. 5. Dose Functions of Input Bias Current of TLV2471CP Operational Amplifier for Different (a) Irradiation Dose Power and (b) Irradiation Temperature:
а: (1) 0.01 rad (Si)/s; (2) 1.4; (3) 9.7; (4) — 62.7;
б: (1) 25; (2) 70; (3) 85; (4) 100 °C

лученные при мощности дозы 9,7 рад(Si)/с и различных температурах при облучении. Из рис. 5, б видно, что деградация исследуемых приборов возрастает с температурой облучения.

Отжиг при комнатной температуре, проведенный для TLV2471CP после накопленной дозы в 2 и 4 крад(Si), показал, что дополнительной деградации во время отжига не происходит, в отличие от результатов, полученных для TLV2451CP (см. рис. 4). Значения входного тока очень быстро релаксируют до начальных значений, измеренных до облучения. Возможно, это обусловлено низким уровнем деградации TLV2471CP при облучении с мощностью дозы 9,7 рад(Si)/с до уровня не более 4 крад(Si).

Для правильной оценки и интерпретации результатов, полученных при облучении операцион-

ных усилителей TLV2471CP, необходимо учитывать, что входные токи данных приборов определяются токами затвора входных МОП-транзисторов (см. рис. 1, б). Следовательно, необходимо исключить из общего измеренного при облучении тока величину генерированного гамма-излучением ионизационного тока (Результаты на рис. 5 представлены уже с учетом исключения вклада ионизационных токов.) На рис. 6 показаны результаты оценки ионизационного тока для различных условий облучения. Представленные значения получены как разность значений входного тока смещения, измеренных в процессе облучения и сразу же после прерывания облучения. Из рис. 6 видно, что ионизационный ток возрастает с увеличением мощности дозы и температуры облучения и практически не меняется во всем исследованном диапазоне доз.

Представленные выше результаты свидетельствуют о том, что исследованные приборы чувствительны как к ELDRS, так и к TDE. Следовательно, при проведении радиационных испытаний с учетом эффектов низкоинтенсивного облучения необходимо объединить существующие подходы к испытаниям МОП- и биполярных приборов. Например, можно использовать широко распространенный подход к моделированию TDE (последовательные операции облучения и отжига), дополнив их процедурами, применяемыми при испытаниях биполярных приборов. В частности, можно использовать облучение при максимальных рабочих температурах и мощности дозы 1—10 рад(Si)/с или облучение при комнатной температуре и мощности дозы не более 0,01 рад(Si)/с. После этого провести отжиг в течение 168 ч при 100 °C (или при максимальной рабочей температуре). Облучение при повышенной температуре

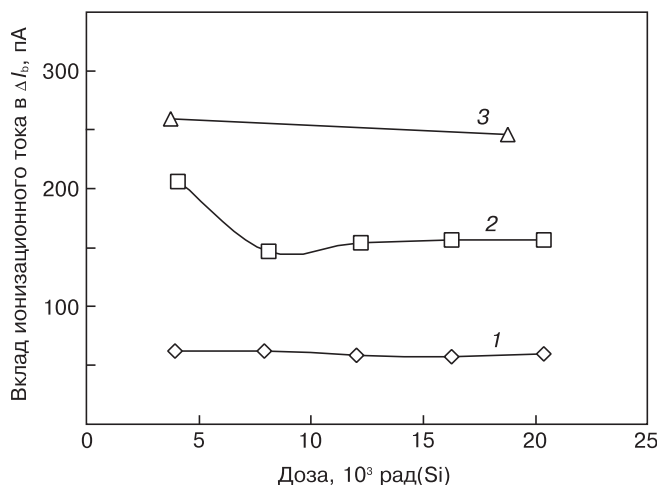


Рис. 6. Вклад ионизационного тока во входной ток смещения операционного усилителя TLV2471CP в зависимости от дозы облучения:
1 — 9,7 рад (Si)/с, 25 °C; 2 — 9,7 рад (Si)/с, 100 °C;
3 — 62,7 рад (Si)/с, 25 °C

Fig. 6. Effect of Radiation Current on Input Bias Current of TLV2471CP Operational Amplifier for Different Irradiation Doses:
(1) 9.7 rad (Si)/s, 25 °C; (2) 9.7 rad (Si)/s, 100 °C; (3) 62.7 rad (Si)/s, 25 °C

выглядит предпочтительней, поскольку оно менее трудозатратное, особенно в случаях, когда требуется достижение высоких уровней дозы. Однако предлагаемые методы требуют дополнительной проверки на других типах аналогичных изделий.

Следует отметить, что механизм деградации входного тока смещения операционных усилителей с биполярным входным каскадом отличается от механизма для случая КМОП–входного каскада. В первом случае рост входного тока смещения определяется увеличением базового тока входных биполярных транзисторов, что обычно приписывается радиационно–индуцированному встраиванию поверхностных состояний. В случае КМОП–входного каскада входные токи определяются токами затвора входных МОП–транзисторов, и рост этих токов уже нельзя объяснить процессом встраивания поверхностных состояний. В этом случае в качестве одной из возможных причин деградации может рассматриваться возникновение радиационно–индуцированного тока утечки [9, 21–24]. Однако данное предположение требует дальнейшего исследования.

Заключение

Установлено, что исследуемые приборы чувствительны как к ELDRS, так и к TDE. Более того, некоторые особенности, присущие TDRE (например, усиление деградации при увеличении температуры облучения), обнаружены при исследованиях операционных усилителей TLV2471CP, содержащих только КМОП–элементы. Следовательно, методы испытаний таких изделий с учетом эффектов низкоинтенсивного облучения могут быть получены путем комбинирования процедур испытаний для изделий КМОП– и биполярной технологии. Очевидно, что это требует дополнительных исследований.

Показано, что механизм деградации входного тока смещения операционных усилителей с биполярным входным каскадом отличается от механизма деградации для случая КМОП–входного каскада. Кроме того, при радиационных испытаниях операционных усилителей с КМОП–входным каскадом необходимо учитывать образование ионизационного тока при облучении. Этот ток может быть определен как разность значений входного тока смещения, измеренных в процессе облучения и сразу же после прерывания облучения.

Библиографический список

1. Pease, R. L. ELDRS in bipolar linear circuits: a review / R. L. Pease, R. D. Schrimpf, D. M. Fleetwood // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2009. – V. 56, N 4. – P. 1894–1908.
2. Shaneyfelt, M. R. Thermal-stress effects and enhanced low dose rate sensitivity in linear bipolar ICs / M. R. Shaneyfelt, J. R. Schwank, J. R. Witzak, D. M. Fleetwood, R. L. Pease, P. S. Winokur, L. C. Riewe, G. L. Hash // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2000. – V. 47, N 6. – P. 2539–2545.
3. Schrimpf, R. D. Physics and hardness assurance for bipolar technologies / R. D. Schrimpf // 2001 IEEE NSREC Short Course Notes. – 2001. – P. IV-1–IV-67.

4. McClure, S. Dependence of total dose response of bipolar linear microcircuits on applied dose rate / S. McClure, R. L. Pease, W. Will, G. Perry // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1994. – V. 41, N 6. – P. 2544–2549.
5. Johnston, A. H. Total dose effects in conventional bipolar transistors and linear integrated circuits / A. H. Johnston, G. M. Swift, B. G. Rax // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1994. – V. 41, N 6. – P. 2427–2436.
6. Beaucour, J. T. Total dose effects on negative voltage regulator / J. T. Beaucour, T. Carriere, A. Gach, D. Laxague // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1994. – V. 41, N 6. – P. 2420–2426.
7. Chen, X. J. Modeling the dose rate response and the effects of hydrogen in bipolar technologies / X. J. Chen, H. J. Barnaby, P. Adell, R. L. Pease, B. Vermeire, K. E. Holbert // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2009. – V. 56, N 6. – P. 3196–3202.
8. Tapero, K. I. Comparison of irradiation at low dose rate and irradiation at elevated temperature to reveal ELDRS in bipolar linear circuits / K. I. Tapero, A. S. Petrov, P. A. Chubunov, V. N. Ulimov, V. S. Anashin // 15th Europ. Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems (RADECS). – 2015. – P. 1–5. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365593
9. Schwank, J. R. Total dose effects in MOS devices / J. R. Schwank // IEEE NSREC Short Course Notes. – 2002. – P. III-1–III-123.
10. Fleetwood, D. M. Using laboratory X-ray and Co-60 irradiations to predict CMOS device response in strategic and space environments / D. M. Fleetwood, P. S. Winokur, J. R. Schwank // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1988. – V. 35, N 6. – P. 1497–1505.
11. Schwank, J. R. Physical mechanisms contributing to device rebound / J. R. Schwank, P. S. Winokur, P. J. McWhorter, F. W. Sexton, P. V. Dressendorfer, D. C. Turpin // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1984. – V. 31, N 6. – P. 1434–1438.
12. Lelis, A. J. Reversibility of trapped hole annealing / A. J. Lelis, H. E. Boesch, T. R. Oldham, F. B. McLean // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1988. – V. 35, N 6. – P. 1186–1191.
13. Lelis, A. J. Response of interface traps during high-temperature anneals / A. J. Lelis, T. R. Oldham, W. M. DeLancey // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1991. – V. 38, N 6. – P. 1590–1597.
14. Hahn, A. Application of rail-to-rail operational amplifiers / A. Hahn // Application report SLOA039A. – 1999. URL: <http://www.ti.com/lit/an/sloa039a/sloa039a.pdf>
15. Petrov, A. S. Influence of temperature and dose rate on the degradation of BiCMOS operational amplifiers during total ionizing dose testing / A. S. Petrov, K. I. Tapero, V. N. Ulimov // Microelectronics Reliability. – 2014. – V. 54. – P. 1745–1748.
16. Witzak, S. C. Accelerated tests for simulating low dose rate gain degradation of lateral and substrate pnp bipolar junction transistors / S. C. Witzak, R. D. Schrimpf, K. F. Galloway, D. M. Fleetwood, R. L. Pease, J. M. Puhl, D. M. Schmidt, W. E. Combs, J. S. Suehle // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1996. – V. 43, N 6. – P. 3151–3160.
17. Witzak, S. C. Hardness assurance testing of bipolar junction transistors at elevated irradiation temperatures / S. C. Witzak, R. D. Schrimpf, D. M. Fleetwood, K. F. Galloway, R. C. Lacoe, D. C. Mayer, J. M. Puhl, R. L. Pease, J. S. Suehle // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1997. – V. 44, N 6. – P. 1989–2000.
18. Романенко, А. А. Влияние ионизирующего излучения низкой интенсивности на биполярные изделия электронной техники / А. А. Романенко // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2002. – Вып. 4. – С. 121–132.
19. Петров, А. С. Применение испытательного стенда контроля стойкости электронной компонентной базы для испытаний биполярных операционных усилителей / А. С. Петров, М. С. Петров, К. И. Таперо, В. Н. Улимов, О. В. Мещуров, А. А. Романенко, В. С. Анашин, П. А. Чубунов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2013. – Вып. 1. – С. 14–17.
20. Таперо, К. И. Особенности радиационных испытаний аналоговых биполярных микросхем с учетом эффекта ELDRS / К. И. Таперо, А. С. Петров, В. Н. Улимов, А. М. Членов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2013. – Вып. 4. – С. 5–10.
21. Таперо, К. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 304 с.
22. Таперо, К. И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях

электронной техники / К. И. Таперо, С. И. Диденко. – М.: Изд. дом МИСиС, 2013. – 349 с.

23. Scarpa, A. Ionizing radiation induced leakage current on ultra-thin gate oxides / A. Scarpa, A. Paccagnella, F. Montera, G. Ghibaud, G. Pananakakis, G. Ghidini, P. G. Fuochi // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1997. – V. 44, N 6. – P. 1818–1825.

Nucl. Sci. – 1997. – V. 44, N 6. – P. 1818–1825.

24. Ceschia, M. Radiation induced leakage current and stress induced leakage current in ultra-thin gate oxides / M. Ceschia, A. Paccagnella, A. Cester, A. Scarpa, G. Ghidini // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1998. – V. 45, N 6. – P. 2375–2382.

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2015 г.

ISSN 1609–3577 Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronic Technics. 2015, vol. 18, no. 4, pp. 291–296.

Radiation induced degradation of CMOS operational amplifiers at different dose rates and temperatures

Konstatntin I. Tapero^{1,2} — Cand. Sci. (Phys.–Math.) (1), Associate Professor (2) (tapero@bk.ru); A. S. Petrov² — Senior Engineer; Viktor N. Ulimov² — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director.

¹ Research Institute of Scientific Instruments,
8 Turayev, Lytkarino, Moscow region 140080, Russia

² National University of Science and Technology «MISIS»,
4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia

Abstract. The degradation of CMOS operational amplifiers with bipolar and CMOS input stages under irradiation at different dose rates and temperatures has been investigated. We show that such circuits can be susceptible to enhanced low dose rate and temporal degradation. Moreover, some features inherent to radiation response of bipolar devices have been revealed in operational amplifiers which contained CMOS elements only, for example, an increase in degradation with the temperature applied during irradiation. This is not typical for most CMOS devices. Our results suggest that the test procedures for devices and integrated circuits containing bipolar and CMOS elements should combine existing test approaches developed for the radiation testing of bipolar and CMOS devices. We have also shown that ionizing current generated by irradiation can affect the input current of operational amplifiers with CMOS input stages as measured during testing. This current can be estimated as the difference between input currents measured during irradiation and immediately after an interruption of irradiation.

Keywords: operational amplifiers, total ionizing dose effects, low dose rate effects

References

1. Pease R. L., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M. ELDRS in bipolar linear circuits: a review. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2009, vol. 56, no. 4, pp. 1894–1908.
2. Shaneyfelt M. R., Schwank J. R., Witczak J. R., Fleetwood D. M., Pease R. L., Winokur P. S., Riewe L. C., Hash G. L. Thermal-stress effects and enhanced low dose rate sensitivity in linear bipolar ICs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2000, vol. 47, no. 6, pp. 2539–2545.
3. Schrimpf R. D. Physics and hardness assurance for bipolar technologies. 2001 *IEEE NSREC Short Course Notes*. 2001, pp. IV–1–IV–67.
4. McClure S., Pease R. L., Will W., Perry G. Dependence of total dose response of bipolar linear microcircuits on applied dose rate. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1994, vol. 41, no. 6, pp. 2544–2549.
5. Johnston A. H., Swift G. M., Rax B. G. Total dose effects in conventional bipolar transistors and linear integrated circuits. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1994, vol. 41, no. 6, pp. 2427–2436.
6. Beaucour J. T., Carriere T., Gach A., Laxague D. Total dose effects on negative voltage regulator. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1994, vol. 41, no. 6, pp. 2420–2426.
7. Chen X. J., Barnaby H. J., Adell P., Pease R. L., Vermeire B., Holbert K. E. Modeling the dose rate response and the effects of hydrogen in bipolar technologies. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 3196–3202.
8. Tapero K. I., Petrov A. S., Chubunov P. A., Ulimov V. N., Anashin V. S. Comparison of irradiation at low dose rate and irradiation at elevated temperature to reveal ELDRS in bipolar linear circuits. 15th *European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*. 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365593
9. Schwank J. R. Total dose effects in MOS Devices. 2002 *IEEE NSREC Short Course Notes*. 2002, pp. III–1–III–123.
10. Fleetwood D. M., Winokur P. S., Schwank J. R. Using laboratory X-ray and Co-60 irradiations to predict CMOS device response in strategic and space environments. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1988, vol. 35, no. 6, pp. 1497–1505.

11. Schwank J. R., Winokur P. S., McWhorter P. J., Sexton F. W., Dressendorfer P. V., Turpin D. C. Physical mechanisms contributing to device rebound. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1984, vol. 31, no. 6, pp. 1434–1438.
12. Lelis A. J., Boesch H. E., Oldham T. R., McLean F. B. Reversibility of trapped hole annealing. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1988, vol. 35, no. 6, pp. 1186–1191.
13. Lelis A. J., Oldham T. R., DeLancey W. M. Response of interface traps during high-temperature anneals. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1991, vol. 38, no. 6, pp. 1590–1597.
14. Hahn A. Application of rail-to-rail operational amplifiers. *Application report SLOA039A*. 1999. URL: <http://www.ti.com/lit/an/sloa039a/sloa039a.pdf>.
15. Petrov A. S., Tapero K. I., Ulimov V. N. Influence of temperature and dose rate on the degradation of BiCMOS operational amplifiers during total ionizing dose testing. *Microelectronics Reliability*. 2014, vol. 54, pp. 1745–1748.
16. Witczak S. C., Schrimpf R. D., Galloway K. F., Fleetwood D. M., Pease R. L., Puhl J. M., Schmidt D. M., Combs W. E., Suehle J. S. Accelerated tests for simulating low dose rate gain degradation of lateral and substrate pnp bipolar junction transistors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1996, vol. 43, no. 6, pp. 3151–3160.
17. Witczak S. C., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M., Galloway K. F., Laco R. C., Mayer D. C., Puhl J. M., Pease R. L., Suehle J. S. Hardness assurance testing of bipolar junction transistors at elevated irradiation temperatures. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1997, vol. 44, no. 6, pp. 1989–2000.
18. Romanenko A. A. Effect of low dose rate ionizing irradiation on bipolar devices and integrated circuits. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyy apparaturu = Questions of atomic science and technique. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment*. 2002, no. 4, pp. 121–132. (In Russ.)
19. Petrov A. S., Petrov M. S., Tapero K. I., Ulimov V. N., Meshchurov O. V., Romanenko A. A., Anashin V. S., Chubunov P. A. Application of the test stand of control the radiation hardness of electronic components for tests of bipolar operational amplifiers. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyy apparaturu = Questions of atomic science and technique. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment*. 2013, no. 1, pp. 14–17. (In Russ.)
20. Tapero K. I., Petrov A. S., Ulimov V. N., Chlenov A. M. Features of radiation tests of analogue bipolar integrated circuits considering ELDRS. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyy apparaturu = Questions of atomic science and technique. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment*. 2013, no. 4, pp. 5–10. (In Russ.)
21. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. *Radiatsionnye efekty v kremniyakh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya* [Radiation effects in silicon integrated circuits intended for space application]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012. 304 p. (In Russ.)
22. Tapero K. I., Didenko S. I. *Osnovy radiatsionnoi stoikosti izdelii elektronnoy tekhniki: radiatsionnye efekty v izdeliyakh elektronnoy tekhniki* [Basics of radiation hardness of electron devices and integrated circuits: radiation effects in electron devices and integrated circuits]. Moscow: Izd. dom MISiS, 2013. 349 p. (In Russ.)
23. Scarpa A., Paccagnella A., Montera F., Ghibaud G., Pananakakis G., Ghidini G., Fuochi P. G. Ionizing radiation induced leakage current on ultra-thin gate oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1997, vol. 44, no. 6, pp. 1818–1825.
24. Ceschia M., Paccagnella A., Cester A., Scarpa A., Ghidini G. Radiation induced leakage current and stress induced leakage current in ultra-thin gate oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1998, vol. 45, no. 6, pp. 2375–2382.

Received December 1, 2015