

Обеспечение радиационной стойкости МОП-транзисторов: влияние одиночных эффектов

Алексей Соколов (Москва)

В статье приведён обзор основных одиночных радиационных эффектов, влияющих на работу силовых радиационно-стойких МОП-транзисторов, а также последние данные испытаний на стойкость к одиночным сбоям.

ВВЕДЕНИЕ

Силовые полевые МОП-транзисторы широко используются в бортовых системах космических аппаратов в цепях синхронного выпрямления, в качестве основных элементов преобразователей в системах электропитания и силовых ключей.

Задача разработки и серийного производства отечественной радиационно-стойкой компонентной базы в целях импортозамещения чрезвычайно актуальна в настоящее время. Так, в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 26 ноября 2007 г. №809 о федеральной целевой программе «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на 2008–2015 гг.», разработка и серийное производство радиационно-стойких отечественных силовых транзисторов является одним из приоритетных направлений развития российской электронной отрасли [1].

В настоящее время в РФ производятся силовые транзисторы, которые не отвечают современным требованиям, предъявляемым производителями космической техники к компонентной базе в том, что касается электрических характеристик и стойкости к ионизирующим излучениям (см. табл. 1). Поэтому ЗАО «Промышленные технологии» ведёт разработку радиационно-стойких силовых МОП-транзисторов n- и р-типов с блокирующими напряжениями 200, 100 и 60 В.

В 1970-х гг. началось производство силовых планарных МОП-транзисторов по технологии двойной диффузии. Силовые МОП-транзисторы имеют вертикальную структуру – носители заряда движутся от истока, расположенного на поверхности кристалла, вертикально к стоку на другой стороне кристалла. В структуре прибора также имеется эпитаксиальный слой кремния, толщина и уровень легирования которого определяется значением блокиру-

ющего напряжения, на которое рассчитан прибор.

В 1990-х гг. появились силовые МОП-транзисторы, произведённые по технологии «трэнч», то есть канавок, полученных плазмохимическим травлением эпитаксиальных пластин кремния. По сравнению с планарной, эта технология обладает следующими преимуществами:

- радикальным снижением сопротивления открытого канала [2];
- низким значением произведения заряда затвора на сопротивление открытого канала [3];
- улучшенными динамическими характеристиками вследствие уменьшения паразитных ёмкостей [4].

На рисунке 1 показан кристалл силового транзистора, разрабатываемого ЗАО «Промышленные технологии».

Преимущества электрических характеристик МОП-транзисторов с «трэнч»-затворами, по сравнению с обычными планарными транзисторами, стимулировали выпуск радиационно-стойких приборов, специально созданных для космических применений. Радиационная стойкость таких МОП-транзисторов требует дополнительных испытаний, поскольку наличие затвора в канавке и более сложная картина

Таблица 1. Сравнительная характеристика отечественных и произведённых в СНГ силовых МОП-транзисторов с зарубежными аналогами

Наименование параметра, единицы измерения	Буквенное обозначение	Производитель, страна производства, наименование				
		ОАО «Ангстрем», РФ, 2П170Б	ОАО «Интеграл», Республика Беларусь, 2П7145А/ИМ	Фрязинский завод мощных транзисторов ОАО «ЦНИИ «Дельфин», РФ, 2П7160И	International Rectifier, США, IRHNA67260	Транзистор, разрабатываемый ЗАО «Промышленные технологии», РФ
Максимально допустимое напряжение сток–исток, В	$U_{си}$, макс	200	200	200	200	200
Постоянный ток стока, А	I_c , макс	45 ¹	30 ³	35 ⁵	56 ⁷	56 ⁹
Сопротивление сток–исток в открытом состоянии, Ом	$R_{си}$, отк	0,035 ²	0,085 ⁴	0,055 ⁶	0,028 ⁸	0,020 ¹⁰
Пороговое напряжение, В	$U_{зи}$, пор	2...4	2...4	-	2...4	2...4
Максимально допустимое напряжение затвор–исток, В	$U_{зи}$, макс	±20	±20	±20	±20	±20
Ток утечки затвора, нА	$I_{з,ут}$	±100	±100	±100	±100	±100
Показатели радиационной стойкости		-	7И1 7С1 7С4 по группе исполнения 1Ус 7И7 по группе исполнения 2Ус 7И6 по группе исполнения 4Ус	7И1 7И6 7И7 по группе исполнения 3У с 7С1 7С4 по группе исполнения 1Ус	Стойкость по накопленной дозе: 300 крад ЛПЭ к ТЗЧ: 60 МэВ·см ² /мг	Стойкость по накопленной дозе: 300 крад ЛПЭ к ТЗЧ: 80 МэВ·см ² /мг

Примечания к Таблице 1. Условия измерения параметров

¹ Ткорпуса = 25°C

³ $U_{зи} = 10$ В, $U_{си} = 4$ В, Ткорпуса = 25°C

⁵ $U_{зи} = 10$ В, $U_{си} = 4$ В, Ткорпуса = 25°C

⁷ $U_{зи} = 12$ В, Ткорпуса = 25°C

⁹ $U_{зи} = 12$ В, Ткорпуса = 25°C

² $U_{зи} = 10$ В, $I_c = 20$ А

⁴ $U_{зи} = 10$ В, $I_c = 18$ А

⁶ $U_{зи} = 10$ В, $I_c = 12$ А

⁸ $U_{зи} = 12$ В, $I_c = 40$ А

¹⁰ $U_{зи} = 12$ В, $I_c = 40$ А

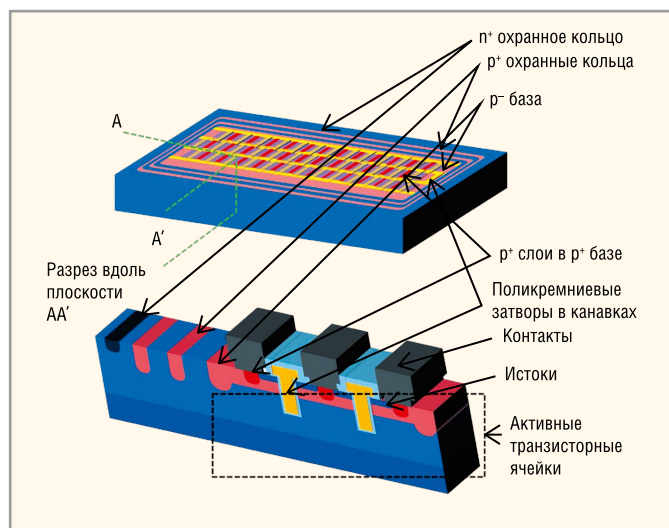


Рис. 1. Кристалл силового 200-вольтового n-канального МОП-транзистора

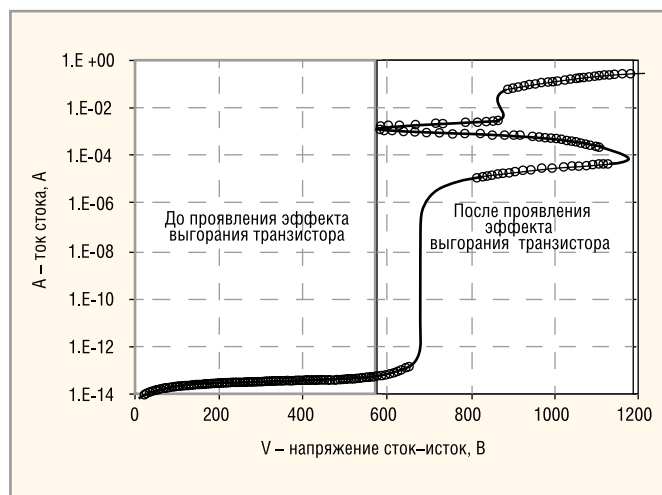


Рис. 2. Квазистационарные вольтамперные характеристики МОП-транзистора в состоянии лавинного пробоя

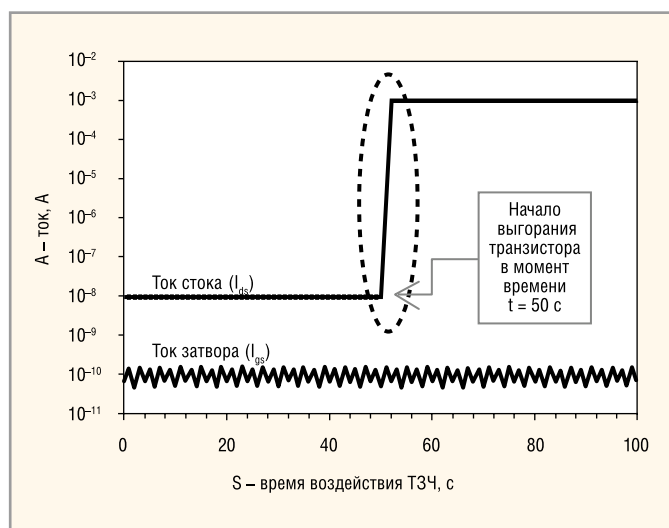


Рис. 3. Токи стока и затвора, возникающие вследствие выгорания транзистора под воздействием ТЗЧ [5]

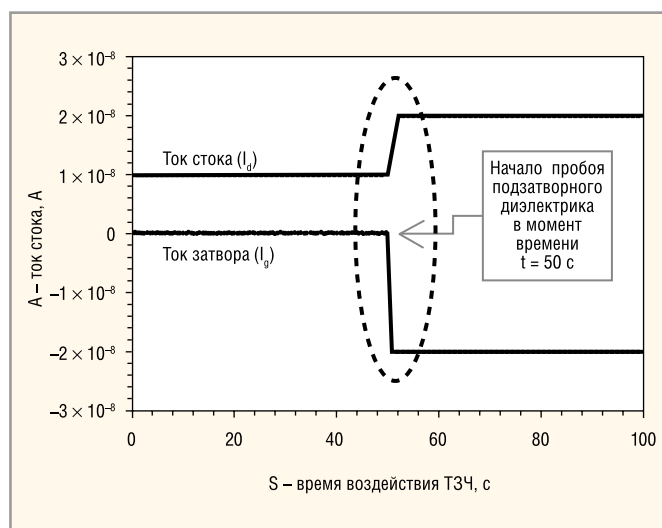


Рис. 4. Токи стока и затвора, возникающие вследствие пробоя подзатворного диэлектрика транзистора под воздействием ТЗЧ

распределения силовых линий электрического поля (по сравнению с планарным ДМОП-транзистором), в процессе работы транзистора усложняет его реакцию на воздействие ионизирующих излучений.

Электрические характеристики МОП-транзисторов в значительной степени подвержены деградации из-за накопленной дозы радиации и одиночных радиационных эффектов (одиночного эффекта выгорания и одиночного эффекта пробоя подзатворного диэлектрика). Рассмотрим более подробно влияние одиночных эффектов на характеристики мощных МОП-транзисторов, в частности, с «трэнч»-затворами.

ОДИНОЧНЫЙ ЭФФЕКТ ВЫГОРАНИЯ

Одиночные радиационные эффекты возникают из-за взаимодействия высокоэнергетических тяжёлых ионов и протонов (тяжёлых заряжен-

ных частиц, ТЗЧ) с полупроводниковым материалом транзистора. Частицы ионизируют атомы кремния на своём пути следования в толще материала. Кроме того, вторичные частицы, возникающие из-за упругих и неупругих столкновений ядер атомов материала, также приводят к его ионизации.

На рисунке 2 представлены вольтамперные характеристики МОП-транзистора на различных стадиях электрического пробоя [5]. При увеличении напряжения сток-исток до определённого значения, МОП-транзистор входит в режим нормального лавинного пробоя. С ростом напряжения на истоке данный процесс продолжается до тех пор, пока падение напряжения внутри p-области не активирует паразитный биполярный транзистор. После этого МОП-транзистор уже не может выдерживать высокие значения напряжения сток-исток. При этом ток стока продолжает увеличиваться, а напряже-

ние на стоке – падать. Из-за обратной связи наступает вторичный пробой, который приводит к короткому замыканию между стоком и истоком, что разрушает прибор.

На рисунке 3 представлены графики изменения токов утечки стока и затвора до и после облучения ТЗЧ, которые вызывают выгорание транзистора. В момент времени $t = 0$ ток истока равен 10^{-8} А, а ток затвора – 10^{-10} А. Перед переходом транзистора в состояние выгорания вышеуказанные токи утечки определяются параметрами прибора, а также измерительной установкой. В момент времени $t = 50$ нс наблюдается значительное увеличение тока стока. При этом ток затвора остаётся неизменным.

ОДИНОЧНЫЙ ЭФФЕКТ ПРОБОЯ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

При прохождении ТЗЧ в эпитаксиальном слое силового транзистора

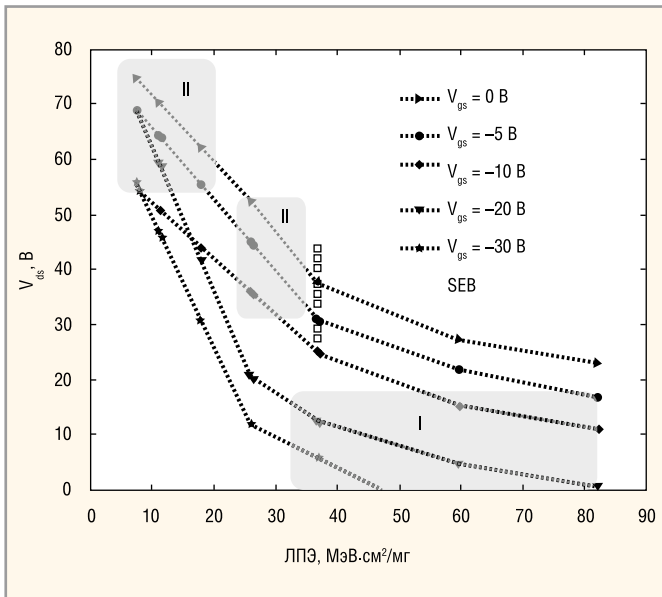


Рис. 5. Пороговые напряжения, при которых начинается выгорание мощного транзистора и возникает пробой подзатворного диэлектрика:
 V_{ds} – напряжение сток–исток; V_{gs} – напряжение затвор–исток

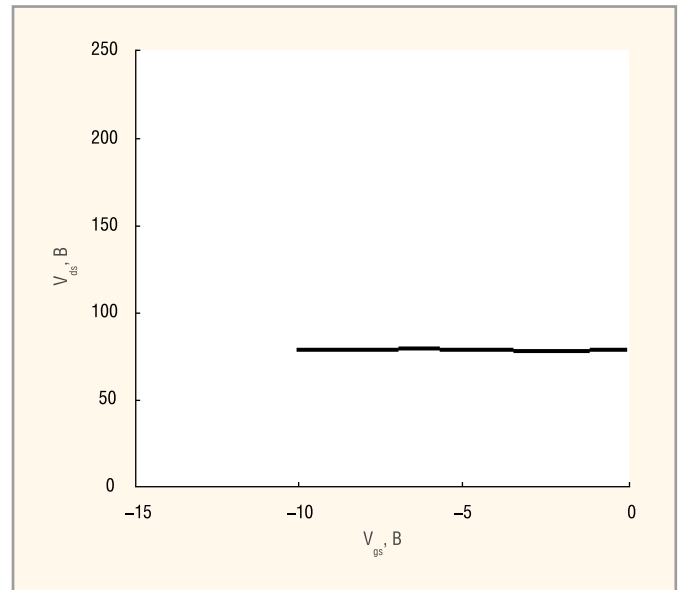


Рис. 6. Результаты испытаний на одиночные радиационные эффекты для SUM45N25-58 [7]: V_{ds} – напряжение сток–исток; V_{gs} – напряжение затвор–исток

генерируются электронно-дырочные пары. В вертикальном электрическом поле происходит разделение заряда: дырки дрейфуют в сторону интерфейса Si/SiO₂, а электроны – в сторону стока. Кроме того, электроны и дырки радикально диффундируют из ионизационного следа.

На границе окисел–полупроводник накапливается избыточная концентрация дырок. Это связано с тем, что дырки дрейфуют в горизонтальном электрическом поле медленнее, чем электроны – в вертикальном. Аккумуляция дырок на границе Si/SiO₂ приводит к появлению дополнительного заряда, а значит дополнительного электрического поля, которое запускает пробой подзатворного окисла. На рисунке 4 представлены электрические характеристики транзистора (ток стока и ток затвора) до и после пробоя подзатворного диэлектрика [5]. В момент времени $t = 0$ нс ток стока равен 10^{-8} А, а ток затвора – 10^{-10} А. В момент времени $t = 50$ нс ток затвора значительно увеличивается. Также ведёт себя и ток стока.

Условия проявления одиночного эффекта пробоя подзатворного диэлектрика и эффекта выгорания

На рисунке 5 представлены графики пороговых напряжений, при которых наступает пробой подзатворного диэлектрика при больших значениях напряжения на затворе. При этом напряжение сток–исток может быть малым (см. область I на рис. 5) [6].

В области малых значений напряжения сток–исток не проявляет себя эффект выгорания, так как пиковая напряжённость электрических полей в эпитаксиальном слое недостаточна для поддержания лавинного пробоя. При малых напряжениях на затворе транзистора и достаточно больших значениях напряжения сток–исток возможно совместное проявление выгорания транзистора и пробоя диэлектрика. В области III напряжение на затворе слишком мало, чтобы инициировать пробой диэлектрика первым (малые значения линейных потерь энергии – ЛПЭ), однако вероятность выгорания транзистора высока из-за высокого

напряжения сток–исток. Следовательно, доминирующим механизмом катастрофического отказа является одиночный эффект выгорания транзистора. В области II возможно либо выгорание транзистора, либо пробой диэлектрика под воздействием ионизирующих излучений (для одинаковых значений напряжений V_{gs} , V_{ds} и ЛПЭ).

Результаты испытаний транзисторов, изготовленных по технологии «Тренч», на одиночные эффекты

В настоящее время опубликовано незначительное число результатов испытаний, описывающих влияние одиночных радиационных эффектов на электрические характеристики «трэнч»-МОП-транзисторов. Далее представлены результаты испытаний воздействия ТЗЧ на МОП-транзисторы следующих производителей: International Rectifier (США) – IRHLF87Y20SCS, Vishay – SUM45N25-58, Vishay – Si7431DP. Электрические характеристики транзисторов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Электрические характеристики силовых МОП-транзисторов с изоляцией канавками

Наименование параметра, единицы измерения	Буквенное обозначение	International Rectifier IRHLF87Y20SCS	Vishay SUM45N25-58	Vishay Si7431DP
Максимально допустимое напряжение сток–исток, В	$U_{си}$, макс	20	250	–200
Постоянный ток стока, А	I_c , макс	12	45	–3,8
Сопротивление сток–исток в открытом состоянии, Ом	$R_{си}$, отк	0,032	0,058	0,174
Показатели радиационной стойкости		Стойкость по накопленной дозе: 100 крад ЛПЭ к ТЗЧ: 60 МэВ·см ² /мг	Не радиационно-стойкий	Не радиационно-стойкий

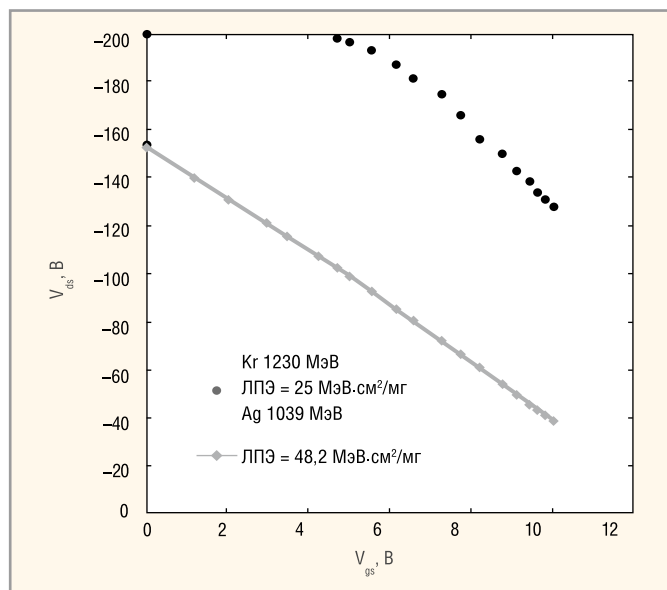


Рис. 7. Результаты испытаний на одиночные радиационные эффекты для Si7431DP [8]: V_{ds} – напряжение сток–исток; V_{gs} – напряжение затвор–исток

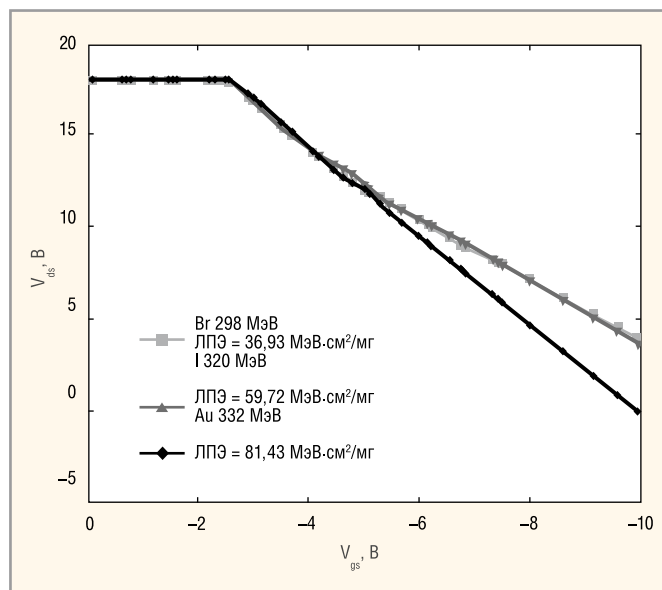


Рис. 8. Результаты испытаний на одиночные радиационные эффекты для IRHLF87Y20SCS [9]: V_{ds} – напряжение сток–исток; V_{gs} – напряжение затвор–исток

Из анализа рисунков 6–8 следует, что только один из рассматриваемых приборов (International Rectifier) не изменяет своего значения пробивного напряжения (при приложенных напряжениях затвор–исток вплоть до $\sim 2,5$ В) под воздействием ТЗЧ (в данном случае ионов брома, йода и золота). С ростом значений напряжения затвор–исток происходит быстрая деградация прибора. Транзистор SUM45N25-58 производства Vishay обеспечивает радиационную стойкость только для половины заявленного блокирующего напряжения (см. рис. 6). Характеристики р-канального транзистора Si7431DP (Vishay) стабильны при облучении ионами криптона до напряжений затвор–исток 5 В (см. рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование технологии изоляции канавками в производстве радиационно-стойких силовых полу-

проводниковых приборов – новое направление развития электроники для космических применений. Сложная физика одиночных радиационных эффектов и другая конструкция полупроводниковых приборов требуют модификации существующих конструктивно-технологических подходов обеспечения радиационной стойкости вновь разрабатываемых приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 26 ноября 2007 г. №809 о федеральной целевой программе «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на 2008–2015 гг.». www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_158088.
2. Jayant Baliga B. Trends in Power Semiconductor Devices. IEEE Transactions on Electron Devices. 1996. V. 43. №10. P. 1717–1729.
3. Ma L., Amali A. et al. New Trench MOSFET Technology for DC/DC Converter Appli-

cations. Power Semiconductor Devices and ICs. Proceedings. 2003. P. 354–357.

4. Lorenz L. Key Power Semiconductor Devices and Development Trends. International Workshop on Physics of Semiconductor Devices. 2007. P. 743–750.
5. Titus J. L. An Updated Perspective of Single Event Gate Rupture and Single Event Burnout in Power MOSFETs. IEEE Transactions on nuclear science. 2013. V. 60. № 3. P. 1912–1920.
6. Allenspach M. SEGR and SEB in N-Channel Power MOSFETS. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996. V. 43. № 6. P. 2927–2931.
7. Lauenstein J.-M. et al. Recent Radiation Test Results for Power MOSFETs. Proceeding of 2013 Nuclear and Space Radiation Effects Conference. 2013.
8. Lauenstein J.-M. et al. SEE Test Report, V. 2. Single Event Effects Testing of the Vishay Si7431DP P-Type Power MOSFET. 2011.
9. www.irf.com/product-info/datasheets/data/irhlf87y20.pdf.



Новости мира News of the World Новости мира

Ivideon привлёк \$4 млн от венчурного фонда Impulse VC

2 июня 2015 г. на «Startup Village» между венчурным фондом Impulse VC и сервисом облачного видеонаблюдения Ivideon (резидентом «Сколково») была заключена сделка об инвестировании.

Ivideon – это сервис облачного видеонаблюдения через Интернет, который позволя-

ет наблюдать за тем, что дорого, где бы вы ни были. Ivideon обеспечивает более миллиона пользователей качественным сервисом каждый день.

К середине 2015 года Ivideon превратился в глобальный и развитый IT-бизнес, имеющий большой объём продаж не только в России, но и в США и Европе. Поэтому, как и любой быстрорастущей

компания, Ivideon потребовались инвестиции для ускорения роста и развития. Верным решением для достижения этой цели было привлечение средств от инвестиционного фонда. Инвестиции пойдут на международную экспансию сервиса Ivideon в Европу, а также Северную и Южную Америку.

Ivideon.com